



ETSAB



Escola Tècnica Superior
d'Arquitectura de Barcelona

Trabajo Final de Máster

APLICACIÓN DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE EN EL MOBILIARIO INTERIOR COMO REGULADORES DE TEMPERATURA

Autor: Mabel Moscoso

Directores: Oriol Muntané / Joan-Lluís Zamora i Mestre

Convocatoria: Octubre 2016

Máster: Tecnología de la Arquitectura. Línea de Construcción e
Innovación Tecnológica

RESUMEN

En la actualidad, uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la sociedad contemporánea es la gestión energética y la contaminación ambiental donde, la creciente demanda energética de los edificios se ha convertido en uno de los temas más alarmantes. Centros de investigación están enfocados en el desarrollo de nuevos métodos orientados a la sostenibilidad, reducción del uso de combustibles fósiles, optimización del suministro de energía y desarrollo de otras alternativas; una de las cuales, pudiera ser la climatización pasiva a través del almacenamiento de energía térmica utilizando materiales de cambio de fase.

Este TFM propone el uso de estos materiales como reguladores de temperatura a escala de mobiliario, en lugar de edificio completo, permitiendo realizar regulaciones de confort puntuales, que ofrezcan mejoras en la gestión de energía para climatización sin la necesidad de realizar reformas significativas.

Se llevó a cabo un experimento del comportamiento térmico comparando dos espacios interiores de acuerdo a la introducción de mobiliarios con PCM. Éste se realizó en unas celdas de ensayo en régimen libre situadas en el campus de ETS Arquitectura del Vallés, en una ubicación exterior y protegidas de la radiación solar directa durante un lapso de 17 semanas. En la siguiente investigación, se presentan los resultados obtenidos y algunas recomendaciones para la integración eficiente en el mobiliario.

ABSTRACT

One of the major problems the contemporary society is facing nowadays is the energy management and environmental pollution, where energy consumption in buildings has become one of the most alarming issues. For this reason, research centers are focused on developing new methods oriented to sustainability, reducing the use of fossil fuel, energy supply optimization and development of new alternatives; one of which, may be passive cooling through storage of thermal energy using phase change materials.

This research proposes the use of these materials as temperature regulators in furniture, instead of entire buildings, allowing to make specific regulations of comfort, and offering improvements in the energy management for acclimatization, without the need of significant reforms or construction work.

An experiment was conducted to test the thermal behavior of two interior spaces according to the introduction of furniture with PCM. The test cells used for these are located at the ETS Arquitectura del Vallés facility in an outdoor location, protected from direct sunlight for a total period of 17 weeks. In this research, the results are presented as well as some guidelines for the efficient integration of PCM in furniture.

ÍNDICE

RESUMEN

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVO.....	2
3.	ANTECEDENTES	3
3.1.	Importancia del Almacenamiento de Energía	3
3.2.	Métodos de Almacenamiento de Energía	3
3.2.1.	Mecánica	3
3.2.2.	Eléctrica	3
3.2.3.	Térmica	4
3.3.	Gestión del Calor Latente como Recurso de Climatización	5
3.4.	Condiciones para el Confort Térmico	6
4.	ESTADO DEL ARTE	8
4.1.	Introducción a los Materiales de Cambio de Fase.....	8
4.1.1.	Definición	8
4.1.2.	Funcionamiento	8
4.1.3.	Propiedades y Características	9
4.1.4.	Clasificación.....	10
4.1.5.	Resumen Comparativo.....	13
4.1.6.	Encapsulación	13
4.2.	Aplicaciones de los Materiales de Cambio de Fase.....	16
4.2.1.	Generales	16
4.2.2.	En la Edificación	17
4.2.3.	Ejemplos de la integración de los PCM en la edificación.....	20
4.3.	Integración de los Materiales de Cambio de Fase en el Mobiliario	26
4.4.	Conclusiones	28
5.	ESTUDIO EXPERIMENTAL	29
5.1.	Metodología	29
5.2.	Contexto General del Estudio.....	31
5.3.	Materiales Empleados	32
5.4.	Instrumentación y Equipo de Mediciones.....	34
5.5.	Desarrollo	35
	Fase 1. Selección y adecuación de las Celdas PAuS.	35
	Fase 2. Verificación de la idoneidad de las celdas.	37
	Fase 3. Selección del Material de Cambio de Fase	40

Fase 4. Fabricación del mobiliario de prueba.	41
Fase 5. Análisis del comportamiento térmico.	42
5.6. Resumen e interpretación de resultados	64
5.7. Verificación de los resultados.....	65
6. RECOMENDACIONES PARA LA INTEGRACIÓN DE LOS PCM EN EL MOBILIARIO	66
7. CONCLUSIONES	70
8. AGRADECIMIENTOS	71
9. REFERENCIAS.....	72

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el ser humano ha aprendido a manipular su entorno, modificarlo y adaptarlo de acuerdo a sus necesidades. Mejorando las prestaciones de temperatura, iluminación o acústica, ha logrado obtener los mejores niveles de habitabilidad y confort en los espacios interiores.

Sin embargo, la mejora de estas prestaciones, especialmente el control térmico, implica un creciente aumento en el consumo y demanda energética en los edificios. En la actualidad, uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la sociedad contemporánea es la gestión energética y la contaminación ambiental donde, la creciente demanda energética de los edificios se ha convertido en uno de los temas más alarmantes.

Empresas, organizaciones y centros de investigación están trabajando sobre este tema, ya que, para ser competitivos a escala internacional, al tiempo que aumenta el precio de los combustibles convencionales, se necesitaría implementar nuevos métodos enfocados en la sostenibilidad, reducción del uso de combustibles fósiles, optimización del suministro de energía y desarrollo de otras alternativas; una de las cuales, sería la climatización pasiva a través del almacenamiento de energía térmica utilizando materiales de cambio de fase.

En las últimas décadas, ha sido un tema de creciente interés, debido a que es un sistema de acondicionamiento pasivo y reducción de la demanda energética, que no solo permite reducir gastos, sino también limitar el uso de los combustibles convencionales.

A escala internacional, una de las organizaciones destacadas en este ámbito de estudio es la Agencia Internacional de la Energía: Conservación de la Energía a través de acuerdos de aplicación de almacenamiento de energía (ECES IA); la cual, con más de 12 países participantes, tiene como misión facilitar una investigación integral, desarrollo, implementación e integración de tecnologías de almacenamiento de energía, con el fin de optimizar la eficiencia energética de todo tipo de sistema de energía y fomentar el uso de la energía renovable en lugar de combustibles fósiles. [1]

A escala nacional, se ha demostrado especial interés en grupos de investigación de universidades de Barcelona, Lleida, Madrid y Zaragoza; así como en el Instituto del Frío del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IF-CSIC). [2]

Gracias al avance y extensa investigación a lo largo de los años, se ha desarrollado una extensa implementación de estos materiales en el sector de la construcción, integrándolos en cerramientos exteriores, revestimientos interiores, sistemas activos de climatización e incluso en elementos estructurales. Sin embargo, esto significa que, para ser utilizados, debe ser previsto desde la fase inicial de diseño o, en todo caso, efectuando reformas en las edificaciones existentes.

Este TFM propone el uso de estos materiales como reguladores de temperatura a escala de mobiliario, en lugar de edificio completo, permitiendo realizar regulaciones de confort puntuales, que ofrezcan mejoras en la gestión de energía para climatización sin la necesidad de realizar reformas significativas.

2. OBJETIVO

Este proyecto tiene por objetivo evaluar la efectividad de la aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura. Para lograrlo, se divide en tres etapas principales:

1. Llevar a cabo un proceso de investigación y análisis del comportamiento de los materiales de cambio de fase, sus propiedades, clasificación e implementación en el sector del mobiliario interior.
2. Realizar un estudio experimental mediante la comparación del comportamiento térmico de dos espacios interiores de acuerdo a la introducción de mobiliarios con PCM, para tener una primera evaluación del impacto real de su implementación.
3. Plantear recomendaciones para la integración eficiente de los materiales de cambio de fase en el mobiliario que sirvan de base para futuras investigaciones.

3. ANTECEDENTES

3.1. Importancia del Almacenamiento de Energía

El consumo de energía parece estar directamente relacionado con el nivel de calidad de vida y el grado de industrialización de cada país, [3] a tal punto que es necesario un suministro fiable de energía las 24 horas del día para realizar casi todas las tareas diarias. Actualmente, el equilibrio entre el consumo y la producción de energía es relativamente fácil de mantener, ya que la mayoría de la energía utilizada es almacenada en combustibles fósiles que pueden ser utilizados cuando sea necesario.

Sin embargo, con la integración de fuentes renovables de energía como la eólica o solar, este equilibrio entre la producción y consumo es más difícil; ya que son fuentes muy fluctuantes. [4] Para contrarrestar esta variabilidad, es necesaria la integración de métodos de almacenamiento de energía, con el fin de garantizar la seguridad del suministro durante períodos de poco o nada de viento o radiación solar.

El almacenamiento de energía puede ser utilizado en momentos de demanda pico, reduciendo la posibilidad de sobrecarga de la red e interrupción del suministro. Además, para aquellas zonas que no tienen acceso a las redes o prefieren ser autosuficientes, el almacenamiento de energía es clave para mantener un suministro constante de energía, sin depender de combustible fósil. [5]

3.2. Métodos de Almacenamiento de Energía

A gran escala, existen principalmente tres formas de energía que pueden ser almacenadas: energía mecánica, eléctrica y térmica.

3.2.1. Mecánica

La energía mecánica está relacionada con la posición (energía potencial) y el movimiento (energía cinética), reflejando la capacidad que tienen los cuerpos con masa de realizar un trabajo. [6] Algunos sistemas de almacenamiento de energía mecánica incluyen el almacenamiento de energía gravitacional, almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo (PHPS), por aire comprimido (CAES) y por Batería Inercial (FES). Las tecnologías PHPS y CAES se pueden utilizar para el almacenamiento de energía a gran escala, mientras que la tecnología FES es más adecuada para escalas menores. El almacenamiento se lleva a cabo en tiempos fuera de hora pico, cuando el costo de la energía es mucho más barato y se utiliza en los momentos cuando se necesita potencia extra y el suministro de la planta de carga base es insuficiente. [7]

3.2.2. Eléctrica

La energía eléctrica es la resultante de una diferencia de potencial entre dos puntos, la cual permite entablar una corriente eléctrica entre ambos, con el fin de obtener algún tipo de trabajo. Esta energía es causada por el movimiento de las cargas eléctricas en el interior de los materiales conductores. [6] El uso de baterías es la opción más común para el almacenamiento de la energía eléctrica. Éstas se cargan mediante la conexión a una fuente de corriente eléctrica continua y, al descargarse, la energía química almacenada se convierte en energía eléctrica. Dentro de sus principales aplicaciones se encuentran la utilización de energía fuera de horas pico, nivelación de cargas y el almacenamiento de la energía eléctrica

generada por las plantas de turbinas eólicas o fotovoltaicas. Los tipos más comunes de baterías utilizadas son las de plomo-ácido y las Ni-Cd. [7]

3.2.3. Térmica

La energía térmica es la fuerza que se libera en forma de calor, mediante la transferencia de energía de un cuerpo a otro debido a una diferencia de temperatura. [8] La energía térmica puede ser almacenada como un cambio en la energía interna de un material, en forma de reacciones químicas, calor sensible o calor latente. [7]

- Reacciones Químicas

Los sistemas de almacenamiento de energía termoquímica se basan en la absorción y liberación de energía que ocurren al momento de romper y reformar los enlaces moleculares en una reacción química completamente reversible. En este caso, el calor almacenado depende de la cantidad de material de almacenamiento, el calor endotérmico de reacción y la extensión de la conversión. [7] Las reacciones termoquímicas poseen una elevada capacidad de almacenamiento térmico (hasta 350 kWh/m³) sin embargo, para llevarse a cabo, requieren altas temperaturas (130°C aproximadamente) haciendo que su aplicación no sea adecuada en estrategias de acondicionamiento pasivo. [9]

- Calor Sensible (SHS)

En los sistemas de almacenamiento de calor sensible, la energía térmica se almacena elevando la temperatura de un sólido o líquido. Los SHS, utilizan la capacidad calorífica y el cambio en la temperatura de los materiales durante el proceso de carga y descarga. La cantidad de calor almacenado depende del calor específico del medio, el cambio de temperatura y la cantidad de material de almacenamiento. [7] Los mayores problemas de este método de almacenamiento térmico son la gran cantidad de masa o volumen que se necesita para el almacenamiento y las pérdidas energéticas que se producen, vinculadas a la variación de temperatura de la masa acumuladora. [9]

- Calor Latente (LHS)

Los sistemas de almacenamiento de calor latente se basan en la absorción o liberación de calor cuando un material experimenta un cambio de fase (sólido – líquido – gas) [7] Son una de las formas más eficaces de almacenamiento de energía térmica ya que, a diferencia del método de almacenamiento de calor sensible, éste proporciona mayor densidad de almacenamiento con menor volumen, con una diferencia de temperatura menor entre almacenamiento y liberación de calor. Este rango de temperaturas es muy amplio, ofreciendo mayor versatilidad que los sistemas de almacenamiento de energía electroquímica. [10]

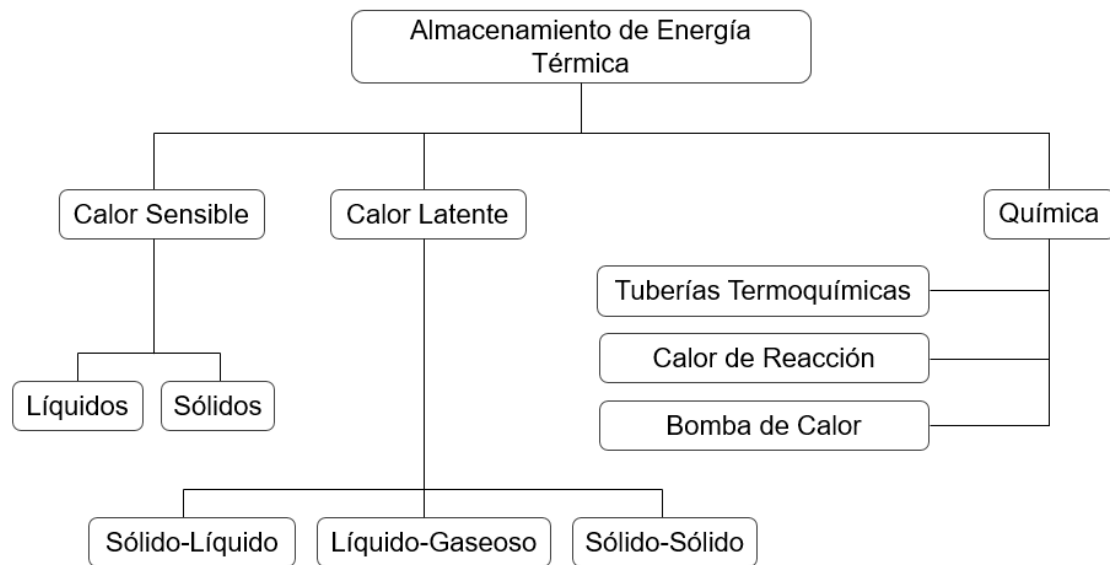


Figura 1. Diferentes tipos de almacenamiento de energía térmica. Redibujada de [7]

3.3. Gestión del Calor Latente como Recurso de Climatización

El aprovechamiento del calor latente de cambio de fase para refrescar el ambiente, es el concepto más antiguo de climatización que existe. Está presente en la naturaleza con la evaporación del agua para refrescar e, incluso, el sistema natural de refrigeración corporal está basado en este principio: la evaporación del agua del sudor provoca una disminución de la temperatura del cuerpo.

Las antiguas civilizaciones observaron este fenómeno natural y entendieron que, para que el agua se evapore, necesita absorber una gran cantidad de calor que adquiere de su entorno inmediato, por consiguiente, enfriándolo. A partir de este concepto, implementaron los primeros sistemas de climatización por evaporación o por cambio de fase agua – vapor en su arquitectura.

En el antiguo Egipto, se refrescaban los espacios utilizando grandes vasijas de barro llenas de agua que aireadas con abanicos de plumas, enfriaban el aire en los días más calurosos. La porosidad del barro permitía mantener la superficie húmeda, facilitando el proceso de evaporación del agua y reduciendo la temperatura ambiente. [11]

El Imperio Persa implementa un sistema basado en captadores de viento en lo alto de una torre, compuesto por aberturas orientadas en dirección al viento que provocan la entrada de aire al interior del edificio. Éste es desplazado a través de unos conductos llamados *qanat*, donde circula agua que lo enfría y humedece, para luego ser redirigido a las plantas inferiores de las edificaciones donde se llevaban a cabo todas las actividades diurnas. El aire caliente es desplazado y escapa por otra abertura de la torre colocada en dirección contraria al viento. [12]

En España, un ejemplo de la implementación de este recurso de climatización es el patio andaluz. Como descendencia de la arquitectura romana y musulmana, las casas se distribuyen en torno a un patio compuesto por fuentes, pozos y abundantes plantas. Debido a los grandes saltos térmicos durante el día y la noche, se produce un intercambio de

temperatura, en el que cerrando los huecos perimetrales exteriores de la edificación y abriéndose hacia las galerías que flanquean el patio, se consigue que el aire fresco se conduzca por convección hacia el interior de la edificación, recorriendo la vertical del patio y conservando las altas temperaturas en la parte superior. [13]

En todos los casos mostrados, se observa que el calor latente del agua es un recurso de climatización utilizado casi exclusivamente en climas caracterizados por altas temperaturas y baja humedad relativa, con el fin de refrescar o enfriar el ambiente. En esos momentos, una vez el agua se convertía en vapor, se perdía, ya que no se contaba con métodos para revertir el proceso y utilizar el cambio de fase vapor – agua para calentar los espacios. Sin embargo, con la introducción de los materiales de cambio de fase, se logra implementar los mismos conceptos utilizados para el agua, además de lograr contener el material y revertir su proceso de cambio de fase para ser utilizado tanto para refrigeración como para calefacción.

3.4. Condiciones para el Confort Térmico

De acuerdo a la norma ISO 7730 [14] el confort se define como una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico. Sin embargo, la temperatura del aire no es el único factor determinante. Junto a la humedad, velocidad del aire y radiación solar; se conforman los cuatro parámetros que condicionan el bienestar térmico.

Con la Carta Bioclimática de Olgyay [15] se representó por primera vez de forma gráfica la envolvente de confort en función de la temperatura y la humedad relativa, incorporando los parámetros de velocidad del aire y radiación solar como medidas correctivas necesarias para recuperar la sensación de confort en cualquier punto situado fuera de la zona.

Tal como se muestra en la Figura 2, con una humedad relativa entre los 20 - 75%, la zona de confort se encuentra entre los 20 - 25 °C en invierno y entre 21 y 28 °C en verano. Sin embargo, esta carta bioclimática se basa en condiciones muy concretas, para una persona con actividad ligera (paseando), vestida con ropa de entretiempo, sin viento y a la sombra en un clima templado.

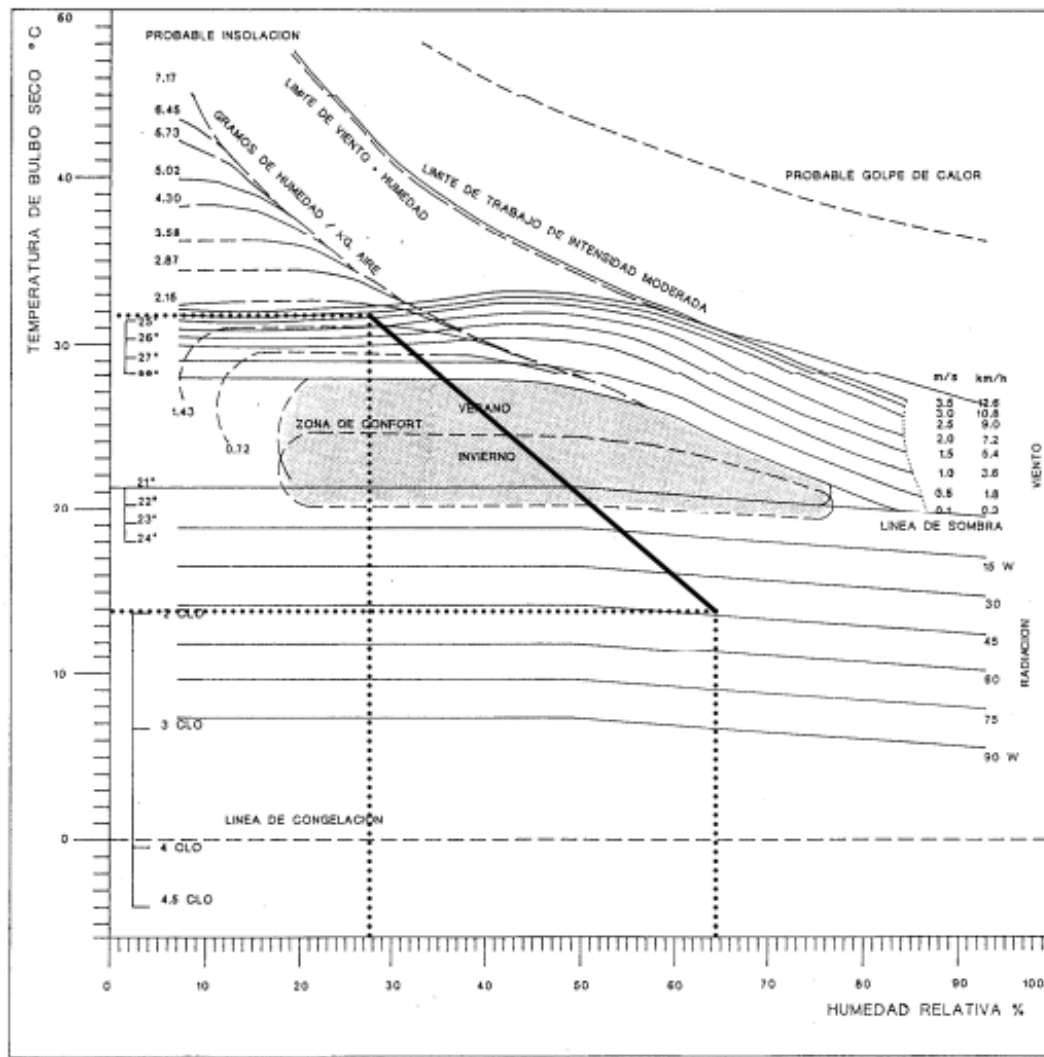


Figura 2. Carta bioclimática de Olgyay. [16]

En el caso de España, el Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios (RITE) [14] establece que para personas con actividad metabólica sedentaria, los valores de la temperatura operativa y de la humedad relativa estarán comprendidos entre los límites indicados en la Tabla 1.

Estación	Temperatura Operativa [°C]	Velocidad Media Aire [m/s]	Humedad Relativa [%]
Verano	23 - 25	0,18 - 0,24	45 - 60
Invierno	21 - 23	0,15 - 0,20	40 - 50

Tabla 1. Condiciones interiores de confort de acuerdo a RITE. [17]

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. Introducción a los Materiales de Cambio de Fase

4.1.1. Definición

Los materiales de cambio de fase o PCM, según sus siglas inglesas de “Phase Change Materials”, son sustancias que absorben una gran cantidad de energía térmica para experimentar un cambio de estado (sólido – líquido – gas); [18] entre los cuales, el más interesante es el cambio sólido – líquido ya que, aunque la cantidad de energía almacenada es inferior a la de otros cambios de estado (sólido – gas), la variación de volumen es mucho menor. [9]

El interés de este tipo de materiales está en que, durante el cambio de fase, la temperatura o calor sensible del material, se mantiene constante, mientras que éste absorbe energía. Este hecho supone una mayor densidad energética, donde los materiales de cambio de fase tienen la capacidad de almacenar 5-14 veces más calor por unidad de volumen de almacenamiento que los demás materiales de almacenamiento de calor sensible tales como el agua, la mampostería o las rocas. [7]

4.1.2. Funcionamiento

La mejor forma para explicar el funcionamiento de estos materiales, es estudiando el proceso de cambio de fase del agua: en estado líquido, el agua va aumentando su temperatura progresivamente hasta alcanzar los 100°C. Una vez alcanza esta temperatura, empieza su cambio de estado en el cual absorberá calor, pero mantendrá una temperatura constante de 100°C hasta que finalice su cambio de fase y todo el líquido se haya convertido en vapor. De manera inversa ocurre cuando la temperatura del agua disminuye hasta alcanzar los 0°C. En este caso, el agua empezará a liberar calor y durante este proceso, mantendrá su temperatura constante en 0°C hasta que complete su solidificación y todo el líquido se haya convertido en hielo. [18] En la Figura 3, se observa cómo la temperatura se mantiene constante en 0°C formando una recta horizontal durante su cambio de fase y posteriormente en 100°C hasta que se convierte en vapor.

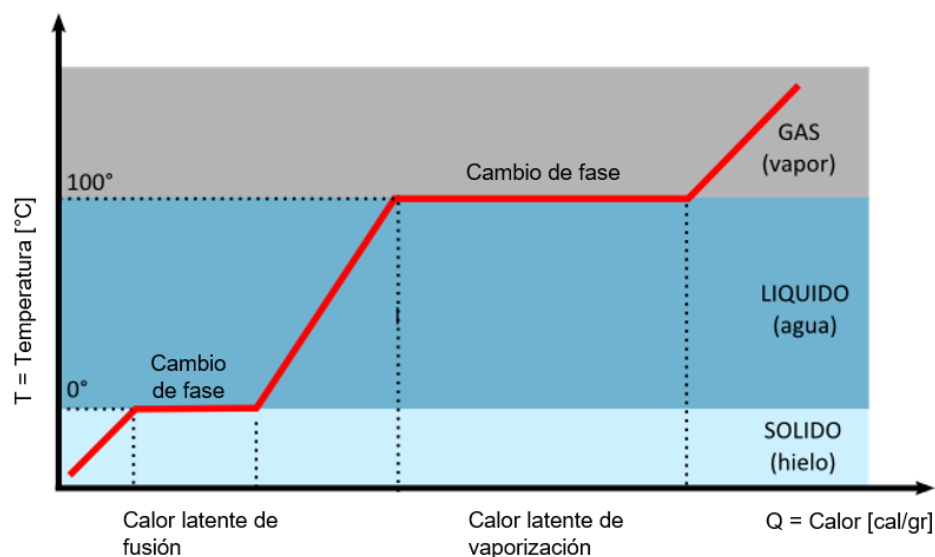


Figura 3. Diagrama de proceso de cambio de fase Hielo – Vapor. Redibujada de [19]

Del mismo modo actúan los PCM, cada uno tiene su propia temperatura de cambio de fase y, gracias a las variaciones de temperatura entre el día y la noche, ocurren los ciclos de fusión y solidificación de estos materiales, resultando en la absorción máxima de energía durante el día, cuando las temperaturas suben; y la disipación de ésta en la noche, cuando la temperatura ambiente baja. La energía utilizada para cambiar el estado del material, dado que la temperatura de cambio de fase es aproximada a la temperatura ambiente de confort deseada, dará lugar a un clima interior más estable y cómodo, así como también, reducirá las cargas de enfriamiento y calefacción en horas pico; especialmente en aquellas edificaciones con baja masa térmica. [20]

4.1.3. Propiedades y Características

Para el óptimo almacenamiento energético, los materiales de cambio de fase deben exhibir ciertas propiedades en función de los siguientes criterios: [7] [9] [21] [22]

Criterios Termodinámicos:

El material de cambio de fase debe poseer:

- Temperatura de cambio de fase en una ventana térmica¹ definida y adecuada a la aplicación deseada.
- Alto calor latente de fusión por unidad de masa, de modo que una menor cantidad de material, almacene mayor cantidad de energía.
- Alta conductividad térmica para facilitar la transferencia de calor.
- Fusión congruente, el material debe fundir homogéneamente de manera que las fases líquida y sólida sean idénticas en composición. De lo contrario, la diferencia de densidades entre sólido y líquido, provoca segregación², resultando en cambios en la composición química del material.
- Poca variación de volumen durante la transición de fase, de modo que la utilización de un contenedor simple una geometría de intercambio de calor sea suficiente para su adecuado funcionamiento.

Criterios Cinéticos:

El material de cambio de fase debe exhibir:

- Poco o ningún subenfriamiento³, la masa fundida debe cristalizar en su punto de congelación termodinámico.
- Poseer suficiente tasa de cristalización.

Criterios Químicos:

El material de cambio de fase debe mostrar:

- Estabilidad química a largo plazo.

¹ Ventana Térmica: Rango de temperaturas en las que ocurre el cambio de fase de un material. [9]

² Segregación: Separación en dos fases distintas al momento de la fusión: una fase acuosa saturada y una sólida. Debido a la diferencia de densidad, la fase sólida se sedimenta y se acumula en la parte inferior de forma irreversible, por lo que durante la cristalización, la fase sólida es incapaz de combinarse nuevamente con la solución saturada impidiendo la formación de la sustancia inicial, perdiendo paulatinamente sus propiedades. [7]

³ Subenfriamiento: Proceso de reducción de la temperatura de un líquido o un gas por debajo de su punto de congelación sin que cambie de fase. Retardo del inicio de la solidificación. [9]

- Ninguna descomposición química o degradación luego de haber completado numerosos ciclos de fusión - congelación.
- No corrosividad para los materiales de construcción o los necesarios para su encapsulado.
- Ser no tóxico, no inflamable y no explosivo.

Criterios Económicos:

El material de cambio de fase debe tener:

- Disponibilidad en grandes cantidades a bajo coste, de modo que sea viable técnica y económicamente.
- Razonable ciclo de vida útil de acuerdo a su coste.
- Reciclable.

4.1.4. Clasificación

Existe un gran número de materiales químicos que pueden ser identificados como PCM, debido a que poseen una temperatura y calor latente de fusión dentro del rango operacional deseado, sin embargo, exceptuando por esta característica, la mayoría de estos materiales, no satisfacen los criterios necesarios para un medio de almacenamiento adecuado como los discutidos anteriormente. [7]

Aquellos que sí responden a estas prestaciones y se encuentran disponibles en el mercado, pueden ser clasificados en tres grandes grupos: orgánicos, inorgánicos y eutécticos. [23]

PCM Orgánicos

Los materiales orgánicos son usualmente subdivididos en Parafinas y No Parafinas.

- Parafinas

Las parafinas son esencialmente un alcano sólido refinado. [9] Químicamente, consiste en una mezcla de alcanos en cadena lineal del tipo $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$, donde la cristalización de la cadena $\text{(CH}_2\text{)}$ - libera una gran cantidad de calor latente. Tanto el punto de fusión, como su calor latente, aumentan de acuerdo a la longitud de la cadena. [7]

[7] [20] [22]

Ventajas:

- Estabilidad química por debajo de los 500°C.
- Químicamente inertes, es decir, no reaccionan con la mayoría de los reactivos químicos comunes.
- Auto nucleación, tasa de cristalización con poco o nada de subenfriamiento.
- No corrosividad.
- Compatibilidad con la mayoría de los materiales de construcción.
- Alto calor de fusión por unidad de masa.
- Baja presión de vapor.
- Fusión congruente, ciclos homogéneos de fusión y congelamiento sin segregación de fases.
- Coste competitivo, a pesar de ser superior al de los PCM inorgánicos.

Desventajas:

- Baja conductividad térmica.
 - Alta variación de volumen durante la transición de fase.
 - Inflamabilidad.
 - No son compatibles con contenedores plásticos.
- No Parafinas

Aquellos materiales orgánicos que no pertenecen al grupo de las parafinas, son los más numerosos de los PCM y poseen propiedades muy variadas. Cada uno cuenta con características particulares, a diferencia de las parafinas, las cuales por lo regular tienen propiedades muy similares entre sí. [7]

Los más estudiados y utilizados dentro de esta categoría son los ácidos grasos, los cuales son derivados de productos animales y vegetales y están constituidos por una larga cadena alifática, de más de 12 carbonos. [9] Están caracterizados por la fórmula $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$, en contraste con una parafina, donde un extremo de la molécula termina con un $-\text{COOH}$ en lugar de un grupo $-\text{CH}_3$. Al igual que las parafinas, su temperatura de fusión aumenta de acuerdo a la longitud de la cadena. [22]

[9] [22]

Ventajas:

- Estabilidad química.
- Auto nucleación⁴, tasa de cristalización con poco o nada de subenfriamiento.
- Alto calor latente de fusión por unidad de masa.
- Fusión congruente, ciclos homogéneos de fusión y congelamiento sin segregación de fases.

Desventajas:

- Baja conductividad térmica.
- Coste elevado, 2-2,5 veces el precio de las parafinas.
- Corrosividad debido a su carácter ácido, no son compatibles con metales.

PCM Inorgánicos

Los materiales inorgánicos son usualmente subdivididos en Sales Hidratadas y Metálicos.

- Sales Hidratadas

Las sales hidratadas pueden ser consideradas como aleaciones de sales inorgánicas y agua, formando un cristalino sólido caracterizado por la fórmula general $\text{M} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, donde M es un compuesto inorgánico. La transformación sólido-líquido de los hidratos de la sal es en realidad una deshidratación e hidratación de la sal, proceso que, termodinámicamente, se asemeja a los ciclos de fusión y cristalización. Estos hidratos de sal, generalmente se funden y resultan en un mismo hidrato de sal, pero con un menor número de moléculas de agua. [7] Estos materiales forman una clase importante de PCM, debido a su alta capacidad de

⁴ Nucleación: Aparición de una nueva fase estable. Generación de la partícula más pequeña de una fase estable capaz de crecer espontáneamente. [59]

almacenamiento de calor por unidad de volumen. De hecho, la sal hidratada más conocida es la llamada sal de Glauber la cual, ha sido muy estudiada en las primeras etapas de investigación sobre los PCM, gracias a su bajo coste y capacidad de almacenamiento. [9]

[7] [20] [21]

Ventajas:

- Mayor capacidad de almacenamiento de calor latente de fusión por unidad de masa que los orgánicos.
- Alta conductividad térmica.
- Bajo coste.
- Compatibilidad con contenedores plásticos.
- Poca variación de volumen durante la transición de fase.
- No inflamables.

Desventajas:

- Fusión incongruente, segregación de fases. Cuando se funde, se separa en dos fases distintas: una fase acuosa saturada y una sólida que generalmente es un hidrato inferior de la sal original. Debido a la diferencia de densidad, la fase sólida se sedimenta y se acumula en la parte inferior del recipiente, mediante un fenómeno llamado descomposición y, a menos que se tomen medidas especiales, este fenómeno es irreversible, es decir que, durante la cristalización, la fase sólida es incapaz de combinarse nuevamente con la solución saturada impidiendo la formación del hidrato de la sal inicial, perdiendo paulatinamente sus propiedades.
- Pocas propiedades de nucleación, por lo que es necesario agregar agentes de nucleación con una estructura cristalina similar a la de la sustancia madre para eliminar el subenfriamiento o reducirlo a un mínimo.
- Corrosividad, no son compatibles con metales.

- Metálicos

Esta categoría está compuesta por metales con un bajo punto de fusión. Sin embargo, su implementación en la tecnología de los PCM, aún tiene sus reservas, debido a penalidades de peso. Ahora bien, cuando el volumen es un factor importante, presentan una buena alternativa, debido a su alto calor de fusión por unidad de volumen y altos niveles de conductividad térmica. [7]

[7] [20]

Ventajas:

- Alto calor de fusión por unidad de volumen.
- Alta conductividad térmica.
- Bajo calor específico.
- Baja presión de vapor.

Desventajas:

- Bajo calor de fusión por unidad de peso.

PCM Eutécticos

Un eutéctico es una composición de los puntos de fusión mínimos de dos o más componentes, los cuales se funden y congelan congruentemente formando una mezcla de los cristales de cada componente durante la cristalización. A diferencia de las sales hidratadas, las mezclas eutécticas se funden y cristalizan con poca o ninguna segregación, debido a que cada uno de sus componentes se funden simultáneamente y cuando cristalizan, crean una mezcla íntima de los cristales, actuando como un solo componente y dejando poca oportunidad para que se separen. [7] Pueden realizarse mezclas eutécticas entre materiales orgánicos y orgánicos, inorgánicos e inorgánicos, así como orgánicos e inorgánicos; dando lugar a una amplia variedad de combinaciones que pueden ser diseñadas a la medida para una aplicación específica. [20]

Ventaja:

- Capacidad de obtener propiedades deseadas para una aplicación en concreto.

Desventaja:

- No son considerados como PCM compuestos puros y muchas de sus posibles combinaciones aún no se han probado y demostrado, por lo que sus propiedades termofísicas aún siguen siendo un campo para futuras investigaciones.

4.1.5. Resumen Comparativo

En la Tabla 2, se presenta un cuadro comparativo con un resumen de las ventajas y desventajas de los PCM orgánicos, inorgánicos y eutécticos.

Resumen Comparativo Ventajas y Desventajas de los PCM		
Tipo	Ventajas	Desventajas
Orgánicos	<ul style="list-style-type: none">- Estabilidad química- Fusión congruente- Poco o nada de subenfriamiento	<ul style="list-style-type: none">- Baja conductividad térmica- Alta variación de volumen durante la transición de fase
Inorgánicos	<ul style="list-style-type: none">- Mayor capacidad de almacenamiento de calor latente de fusión por unidad de masa que los orgánicos- Alta conductividad térmica- Poca variación de volumen durante la transición de fase	<ul style="list-style-type: none">- Fusión incongruente, segregación de fases- Pocas propiedades de nucleación, mayor probabilidad de subenfriamiento
Eutécticos	<ul style="list-style-type: none">- Capacidad de obtener propiedades deseadas para una aplicación en concreto	<ul style="list-style-type: none">- Alto costo- Información limitada sobre las propiedades termofísicas de muchas de sus posibles combinaciones.

Tabla 2. Resumen comparativo de las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de PCM

4.1.6. Encapsulación

Uno de los criterios que ha limitado el uso generalizado de los PCM, es la incompatibilidad entre estos materiales y sus contenedores, afectando su estabilidad a largo plazo, degradado sus propiedades y provocando la corrosión de sus recipientes de embalaje. Como respuesta

a estos inconvenientes, han surgido diferentes técnicas de encapsulación de los PCM, las cuales ofrecen unas ventajas significativas, tales como:

- Aumento del área de transferencia de calor.
- Reducción de la reactividad hacia el ambiente exterior.
- Control de los cambios en el volumen, éstos ocurren dentro de la capsula.
- No hay absorción de humedad.

Los métodos de encapsulación, clasificados de acuerdo a su tamaño, pueden ser de dos tipos: micro y macro encapsulados. [24]

Micro-encapsulación

Gracias a nuevas tecnologías, se ha desarrollado la técnica de micro-encapsulación, mediante la cual mínimas porciones de un principio activo, los PCM, son recubiertas por un envolvente de un segundo material, la membrana, para protegerlo del entorno que lo rodea. [25] [26]

El material de la membrana exterior debe ser compatible con el PCM y, a su vez, ser capaz de hacer frente a la tensión mecánica sobre las paredes del recipiente, provocada por las variaciones de volumen durante el cambio de fase. Las dimensiones de estas micro-cápsulas suelen estar en el orden de 1 μm a 1000 μm de diámetro. [20] [22]

Ventajas:

- Mejora de la transferencia de calor, debido a la gran superficie en relación al volumen de las cápsulas.
- Mejora de la estabilidad de ciclos, ya que la separación de fases está restringida por distancias microscópicas.
- Integración de los PCM a las mezclas como un árido más.

Desventajas

- Aumento de la probabilidad de subenfriamiento.
- No recomendado para sales hidratadas.

Por lo general, los PCM micro-encapsulados se encuentran comercialmente disponibles en dos formatos: dispersión fluida, donde las cápsulas son dispersadas en agua o en polvo, para la elaboración de mezclas en seco.



Figura 4. Micronal PCM. Formato de dispersión fluida y en polvo. Fabricante: BASF, The Chemical Company. Ejemplo de material de construcción con micro-encapsulación ver punto 4.2.3.

Macro-encapsulación

La macro-encapsulación hace referencia a PCM encapsulados en cualquier tipo de recipiente, tal como tubos, esferas o paneles que pueden ser incorporados en materiales de construcción o que actúan como intercambiadores de calor por sí mismos. El tamaño de estos contenedores es por lo general más de 1 cm³, almacenando desde varios mililitros hasta varios litros. [20]

Ventajas [22]

- Evitar cambios en la composición de los PCM, causados por el contacto con elementos externos.
- Dependiendo de su rigidez, puede añadir estabilidad mecánica al sistema.
- Utilización de recipientes ya disponibles en el mercado.

Desventajas [20]

- Tendencia a solidificar / fundir en los bordes del recipiente, reduciendo el tiempo de absorción y liberación de energía y evitando que el sistema se descargue completamente durante la noche. La geometría del recipiente juega un papel importante.
- Su tamaño implica que tienen que ser protegidos contra la destrucción o la perforación, al igual que una mayor dificultad para integrarlo a otros sistemas.

Los medios de macro-encapsulación utilizados comúnmente son los envases y bolsas de plástico o metal.

La principal ventaja de los envases plásticos es la disponibilidad en el mercado y la facilidad de producirlos en una gran variedad de formas y con pocas restricciones geométricas. Además, son compatibles con la mayoría de PCM, incluyendo las sales hidratadas, por lo general no presentan degradación aunque algunos materiales orgánicos pueden llegar a suavizarlos. [22]



Figura 5. Macro-cápsulas plásticas de distintos tamaños y bolsas de polímeros con recubrimiento transparente. Fabricante: Rubitherm Technologies GmbH. Ejemplo de material de construcción con macro-encapsulación ver punto 4.2.3.

Por otro lado, si la transferencia de calor es un factor determinante, la baja conductividad térmica de los recipientes plásticos puede representar un problema. En este caso, una buena alternativa serían los recipientes metálicos. Éstos incluso pudieran aportar una mayor estabilidad mecánica si se elige un espesor suficiente, sin embargo, para su selección, se debe tomar en cuenta la compatibilidad con el PCM y las posibilidades y restricciones formales que existan en cuanto al modelado de los envases.

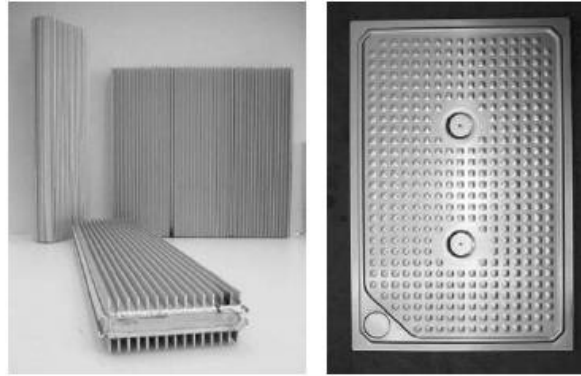


Figura 6. Izquierda: Perfiles de aluminio con aletas para mejor transferencia de calor. Fabricante: Climator. Derecha: Placa recubierta de aluminio. Fabricante: Rubitherm Technologies GmbH. Ejemplo de su aplicación ver punto 5.3.1.

4.2. Aplicaciones de los Materiales de Cambio de Fase

4.2.1. Generales

Con ventanas térmicas que oscilan por debajo de los -10°C hasta por encima de los 90°C , las aplicaciones de los PCM poseen una extensa gama de posibilidades: [27]

Logística y Transporte.

Los PCM son capaces de garantizar la estabilización de la temperatura de los productos y mercancías. Especialmente en el campo de la logística de productos farmacéuticos, que cumplen con las altas exigencias de este sector. Además, ya han sido probados para el transporte de máquinas, obras de arte y alimentos; sectores que presentan especial sensibilidad a la temperatura. Los PCM, con ventanas térmicas entre $2 - 8^{\circ}\text{C}$, se vierten en recipientes de plástico y actúan como acumuladores de refrigeración.

Sector de la Automoción

Los PCM tienen una variedad de aplicaciones en el sector de la automoción. Mientras se conduce, el PCM almacena el frío proveniente del aire acondicionado. Durante los períodos de espera, por ejemplo, en los semáforos, este frío almacenado es liberado por un ventilador, manteniendo la temperatura en un nivel confortable. Otra aplicación sería el almacenamiento del calor del motor, de manera que para su siguiente arranque (en frío), se acorte considerablemente la fase de calentamiento del motor, contribuyendo a minimizar su deterioro a largo plazo y reducir el consumo de combustible.

Asistencia Sanitaria y Médica

Debido a su gran capacidad de almacenamiento de calor y la posibilidad de obtener una temperatura deseada, los PCM son recursos frecuentemente utilizados en las terapias de frío y calor: Refrigerar el cuerpo sin llegar a la hipotermia, bolsas de enfriamiento para el tratamiento de quemaduras y bolsas de cirugía para mantener el cuerpo a una temperatura estable durante la operación y recuperación.

Alimentación

Similar a la regulación de la temperatura en la logística de productos farmacéuticos, la temperatura puede ser garantizada sin necesidad de utilizar dispositivos externos. Pueden ser aplicados en casos de problemas técnicos de las unidades de refrigeración y en largos de períodos de almacenamiento antes de su entrega. Por otro lado, PCM con altos puntos de fusión, son utilizados para mantener calientes los alimentos pre-cocinados, o los platos ya listos, en espera de ser servidos.

Industria Textil [28]

La incorporación de micro-cápsulas con PCM en los textiles para mejorar su rendimiento térmico fue desarrollada en la década de 1980 bajo el programa de investigación de la NASA, con la intención de utilizar estas telas en los trajes espaciales y proporcionar una mejor protección térmica contra las fluctuaciones de temperatura extremas en el espacio. Hoy en día se comercializan como “Smart Textiles” los cuales, incorporando PCM con un cambio de fase justo por encima y por debajo de la temperatura de la piel humana, regulan la temperatura dependiendo del nivel de actividad física del cuerpo y la temperatura exterior. Se han empezado a utilizar en ropa deportiva, ropa de cama (edredones, almohadas o fundas de colchones) y en aplicaciones médicas como mencionado anteriormente.

Esto es posible mediante la adición de micro-cápsulas con PCM a una solución de polímeros antes de la extrusión de la fibra. De esta forma, el PCM viene integrado directamente dentro de la propia fibra.

4.2.2. En la Edificación

Desde 1932, se conocen las primeras pruebas para la implementación de los materiales de cambio de fase en la construcción. En este año, A.A.H. Douglas inventó un aparato de almacenamiento térmico compuesto por un contenedor relleno de PCM, específicamente de parafinas y ácido esteárico. Una vez utilizado el calor almacenado, se recargaba durante el periodo valle eléctrico, donde la tarifa de consumo es la menor. [9]

Sin embargo, fue la doctora María Telkes, investigadora del Massachusetts Institute of Technology (MIT), quien logró el primer resultado práctico a finales de 1948, construyendo la única casa existente hasta el momento calentada exclusivamente con energía solar: La casa Dover de 135 m² en Massachusetts, Estados Unidos. [29]

La energía solar se recogió mediante unas placas de absorción de acero galvanizado, pintadas de negro y colocadas detrás de un doble acristalamiento. El calor generado pasaba a lo largo de un conducto hasta llegar a unos recipientes de almacenamiento de calor rellenos de 21 toneladas de sal de Glauber, situados en el interior de las habitaciones. (Figura 7)

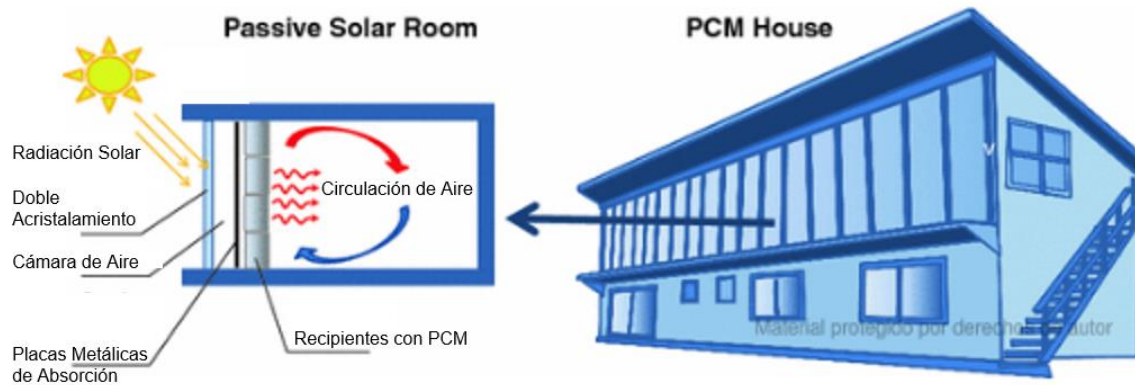


Figura 7. Esquema de funcionamiento casa Dover. Redibujada de [29]

En días nublados cuando no se podía captar la energía solar, un mecanismo de calefacción mediante un ventilador, calentaba el sistema, logrando que se reiniciara el PCM. Sin embargo, se estimó que las 21 toneladas de sal serían suficientes para calentar la casa durante un periodo de 10 días sin sol.

El sol fue la única fuente de energía para calentar la casa Dover por dos inviernos y medio. Sin embargo, el ácido sulfúrico es corrosivo, por lo que algunos de los contenedores de Telkes presentaron daños y filtraciones. Además, cuando la sal de Glauber se funde, el sulfato de sodio más pesado se hunde hasta el fondo del recipiente y la solución de agua más ligera flota en la parte superior. Si la sal no logra mezclarse nuevamente a medida que se cristaliza, no es capaz de liberar el calor almacenado. Durante el tercer invierno, las sales separadas no pudieron ser remezcladas, por lo que el sistema eventualmente fracasó. [29] [30]

Estos primeros estudios marcaron el inicio de la búsqueda por mejores y más eficientes formas de implementar los materiales de cambio de fase en la construcción. En la actualidad, se ha logrado integrar estos materiales en casi todos los componentes de las edificaciones a través de diferentes sistemas que pueden ser clasificados a grandes rasgos como sistemas activos y pasivos. [20]

Sistemas Activos

La capacidad de almacenamiento de los PCM puede ser integrada a sistemas activos de climatización, tales como bombas de calor, sistemas de recuperación de calor, calefacción por suelo radiante o de refrigeración por absorción. Estos sistemas pueden ser combinados para lograr una reducción de la carga de pico, incluso, significan un ahorro económico y energético gracias a la reducción de la demanda eléctrica para estos sistemas de HVAC.

Otro método es el "Free Cooling" o enfriamiento gratuito donde se utiliza una unidad de almacenamiento térmico con PCM para almacenar el frío exterior cuando la temperatura ambiente es más baja en comparación con la temperatura interior. Este frío se extrae de la unidad cuando se necesita, mediante el uso de un ventilador eléctrico.

El principio de su funcionamiento, como se muestra en la Figura 8, consta de dos procesos: El primero es el proceso de carga que se lleva a cabo durante la noche, donde el aire frío de la atmósfera fluye a través de la unidad de almacenamiento provocando que el PCM líquido empiece a solidificarse. Este proceso continúa hasta que se obtienen temperaturas más bajas que el cambio de fase del PCM, haciendo que éste se solidifique completamente. El segundo

es el proceso de descarga (refrigeración de aire) ocurre cuando la temperatura se eleva por encima del límite de confort deseado. El aire caliente interior pasa a través de la unidad de almacenamiento, donde el PCM ya solidificado absorbe este calor mientras se funde. Así, el aire enfriado es devuelto al espacio interior utilizando el ventilador eléctrico.

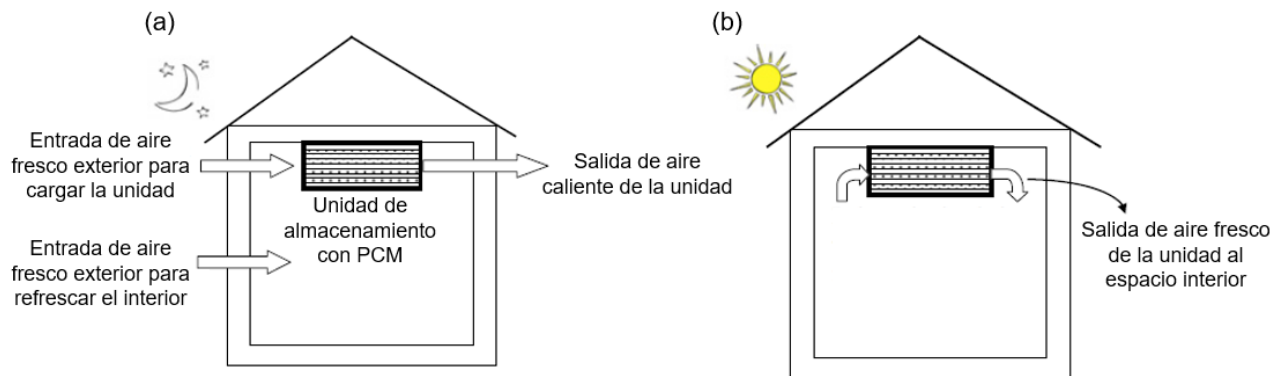


Figura 8. Principio de funcionamiento del enfriamiento gratuito utilizando PCM. (a) Principio de carga. (b) Principio de descarga. Redibujada de [31]

Sistemas Pasivos

En sistemas pasivos, los PCM se integran en las envolventes y componentes de los edificios para aumentar su masa térmica. Esto es especialmente beneficioso en construcciones ligeras, que generalmente poseen baja inercia térmica. Los PCM se derriten durante el día y cristalizan durante la noche, evitando el sobre calentamiento de los espacios durante el día en los meses más cálidos y reduciendo la necesidad de calefacción durante la noche en el invierno. Sin embargo, un problema que se ha planteado con estos sistemas pasivos es la necesidad de lograr una descarga completa del material durante la noche en los períodos cálidos, donde la temperatura del ambiente no llega al punto de cristalización del material. Este inconveniente hace que la implementación de los PCM sea más eficaz en climas con mayor oscilación térmica diaria.

Sin importar el sistema que se utilice, la implementación de estos materiales en la construcción conlleva distintos beneficios:

Desplazamiento de la Carga Pico [20]

Las cargas pico a lo largo del día afectan los espacios interiores, provocando grandes fluctuaciones de temperatura, que conducen al uso de calefacción, ventilación mecánica y sistemas de aire acondicionado (HVAC). Sin embargo, con la implementación de PCM, es posible reducir y desplazar estas cargas fuera de las horas pico de la demanda eléctrica, contribuyendo así tanto al ahorro energético, como económico.

La Figura 8 muestra cómo la carga pico para climatizar se reduce y desplaza con la implementación de sistemas con materiales de cambio de fase.

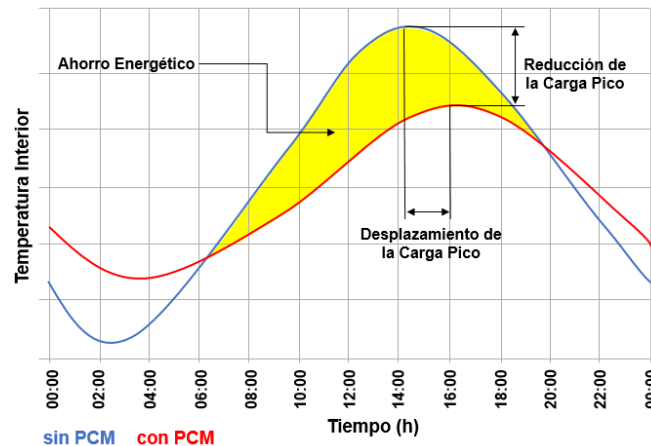


Figura 9. Ilustración del desplazamiento y reducción de la carga máxima. Redibujada de [20]

Control del Confort Térmico [20]

Otro de los beneficios de la utilización de los PCM en la construcción es el aumento del confort térmico general de un espacio interior. En un estudio realizado por Lan et al. [32] se demostró una correlación entre el rendimiento y productividad de los trabajadores en relación a la sensación de confort térmico debido al cambio de temperatura. Se comprobó que elevadas temperaturas tienen un efecto negativo en el rendimiento y la productividad. Cuando la temperatura interior se encontraba cerca de los 22°C, se presenció un aumento en el rendimiento de trabajo. Sin embargo, cuando ésta aumentó por encima de los 30°C, hubo una disminución de la productividad.

Mantener una temperatura constante alrededor de la zona de confort durante periodos más largos sin depender de los sistemas HVAC es posible con los materiales de cambio de fase, ya que reducen las fluctuaciones de temperatura, manteniéndola relativamente constante. Para lograrlo, el punto más importante es la selección de un PCM con una ventana térmica adecuada, de manera que las temperaturas se mantengan estables en torno a esta temperatura de confort, reduciendo la sensación de incomodidad térmica debido a las fluctuaciones de temperatura durante todo el día.

4.2.3. Ejemplos de la integración de los PCM en la edificación.

Mediante la micro-encapsulación, los PCM pueden ser integrados a otros materiales de construcción. Esto ha generado bastante interés, ya que permite construir de la misma forma que se hace hoy en día, pero con materiales que poseen una mayor capacidad de almacenamiento de energía térmica.

Paredes

- Muro Trombe

Un muro Trombe convencional consiste en una pared gruesa de mampostería orientada al sol, a la cual, conservando una cámara de aire, se le coloca una capa simple o doble de vidrio o plástico por delante. El calor se acumula en esta cámara entre el muro y el acristalamiento; la superficie exterior de la pared es de color negro, por lo que este calor es absorbido y almacenado en la masa de la pared. Cuando la temperatura interior disminuye por debajo de la de la superficie de la pared, el calor empieza a irradiar dentro de la habitación. [23]

Sin embargo, con la implementación de los PCM, se puede lograr la misma capacidad térmica con un cerramiento mucho más ligero y de menor espesor. Bourdeau [33] compara un muro Trombe de mampostería con otro utilizando hexahidrato de cloruro cálcico, con un punto de fusión 29°C, como material de cambio de fase. Se llegó a la conclusión de que una pared de 8,1 cm de espesor con PCM presenta un mejor rendimiento térmico que un muro de mampostería de 40 cm.

- Paneles de Yeso

Actualmente, la solución más común para la implementación de los PCM en las edificaciones es mediante la instalación de paneles de pared con PCM en el lado interior de la envolvente del edificio. En estructuras ligeras, con baja inercia térmica, esta solución puede proporcionar un aumento significativo de la capacidad de almacenamiento térmico. [23]

Los paneles más utilizados son los de yeso integrados con PCM, debido al bajo coste del material, fácil manipulación y disponibilidad en el mercado. Un ejemplo es el Knauf PCM Smartboard o Comfortboard, el cual contiene Micronal PCM del fabricante BASF con un cambio de fase de 23 o 26 °C. Se ha demostrado que un tabique con dos paneles de 1,5 cm presenta la misma capacidad térmica que un muro de ladrillo perforado de 36,5 cm o un muro de hormigón de 14 cm. [34] (Figura 10)

Los alumnos de la Universidad de Tecnológica de Darmstadt, ganadores del premio “Solar Decathlon 2007”, [35] desarrollaron una casa de 80 m² donde se utilizaron estos Smartboard de 15 mm de espesor con un cambio de fase de 23°C; logrando almacenar el calor equivalente a una pared de hormigón de 90 mm. [23]



Figura 10. Izquierda: Comparativa del panel Knauf PCM Smartboard con otros cerramientos con capacidad térmica equivalente. Redibujado de [34]. Derecha: Proyecto de la Universidad de Tecnológica de Darmstadt para el “Solar Decathlon 2007”. [36]

Pavimentos

Los elementos que ocupan la mayor superficie en una edificación, presentan un gran potencial para el almacenamiento de energía térmica. Un ejemplo de esto es el pavimento el cual, al integrarse con materiales de cambio de fase, puede cumplir la función de aumentar la masa térmica, contribuyendo a regular la temperatura interior o como complemento a un suelo radiante. [20]

Un ejemplo del primer caso, es el pavimento utilizado en la North House, diseñada por Team North de la Universidad de Waterloo para el “Solar Decathlon 2009”. Aquí, se utilizó el DELTA-COOL 21 como material de cambio de fase macro-encapsulado en perfiles planos que se instalaron debajo del acabado de madera. [37] [38]

Los materiales de cambio de fase en todo el piso del North House actúan como una masa térmica, regulando la temperatura interior con tanta eficacia como los métodos tradicionales de masa térmica, mientras que ocupa menos espacio. Este sistema contribuye con la mejora de la comodidad al interior del edificio, reduciendo el efecto de las oscilaciones de temperatura día / noche ambiente. [37] [38]

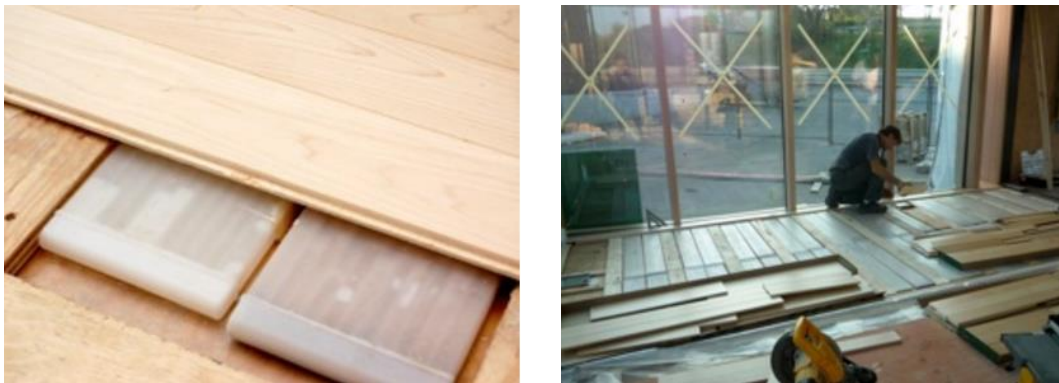


Figura 11. Instalación de DELTA-COOL 21 para el pavimento de la North House. Fuente: [38]

Un ejemplo de un sistema de suelo radiante que incorpora PCM ha sido descrito por Ansuini et al. [39]. El sistema desarrollado consiste en un suelo radiante ligero integrado con una capa de PCM, diseñado tanto para el almacenamiento y liberación eficiente de la energía en la temporada de invierno y para amortiguar las ganancias internas en los regímenes de enfriamiento de verano.

El PCM utilizado fue el GR27 de Rubitherm, un granulado a base de parafina. El sistema radiante se compone de tubos de 8 mm de diámetro interior, fijados a una distancia de 55 mm uno de otro. Además, se coloca una matriz de acero diseñada por Eurotherm S.P.A. para actuar como difusor térmico y aumentar la conductividad. (Figura 12)



Figura 12. Suelo radiante integrado con PCM. Fuente: [39]

Se realizó un experimento en condiciones dinámicas reales para analizar el comportamiento del suelo radiante y su impacto en el confort de una sala de 16 m². En condiciones de verano, el suelo radiante con PCM utilizado para la refrigeración, permite un ahorro de aproximadamente 25% del agua utilizada para la refrigeración. Por otro lado, en un régimen de calentamiento de invierno, la capa de PCM no afectó la capacidad de calentamiento del sistema, actuando de manera comparable a un suelo radiante tradicional en los regímenes de invierno.

Falsos Techos

La implementación de los PCM en falsos techos para la refrigeración puede darse tanto de forma pasiva, similar a los paneles de yeso en las paredes (Figura 13); como de forma activa, integrándolos a sistemas mecánicos de enfriamiento, utilizados durante la noche para la cristalización del PCM. [29] (Figura 14)

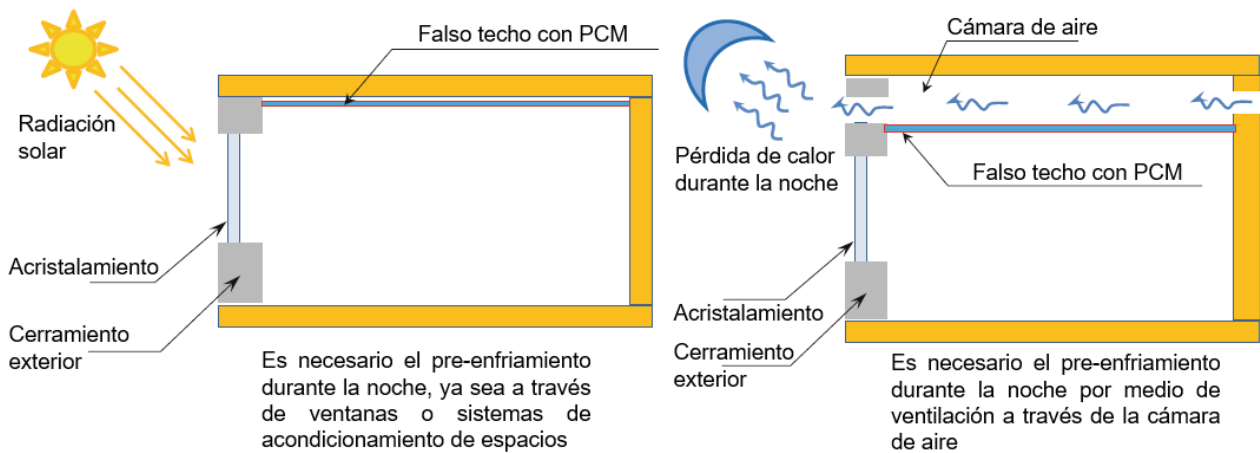


Figura 13. Aplicaciones pasivas de falsos techos con PCM. Redibujada de [29]

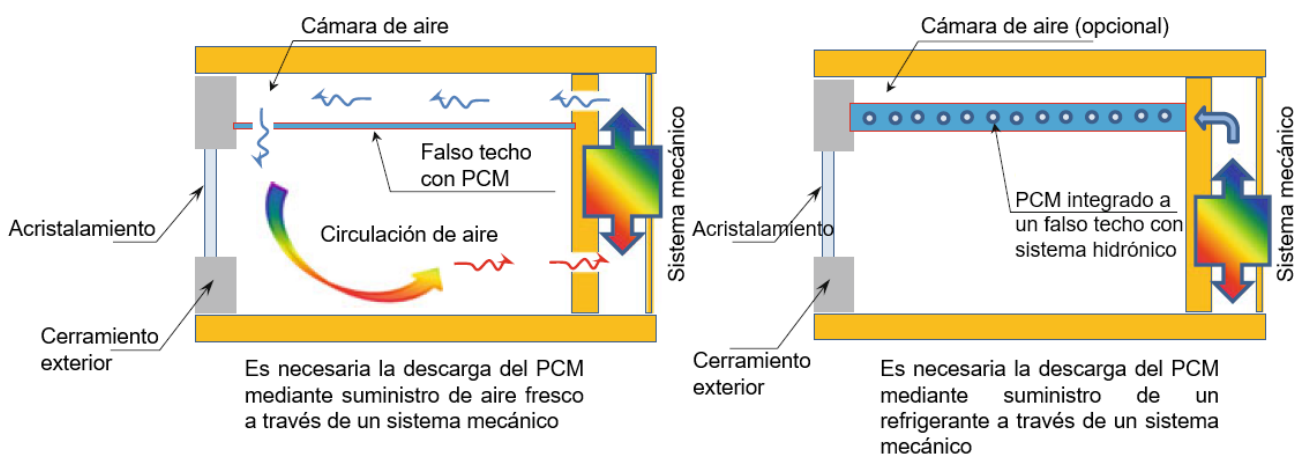


Figura 14. Aplicaciones activas de falsos techos con PCM. Redibujada de [29]

En un estudio realizado por Kondo e Ibamoto [40] de la Universidad de Kanagawa, se utilizaron placas de lana de roca mejoradas con PCM en el falso techo, con el fin de reducir la carga pico de refrigeración del sistema de aire acondicionado en un edificio de oficinas en Japón.

El panel de techo se desarrolló insertando PCM micro-encapsulado a un panel de techo común de lana de roca. El PCM utilizado es un producto comercial de Mitsubishi Paper Mills Ltd., con un punto de fusión de aproximadamente 25°C.

Similar al primer caso de sistema activo presentado en la Figura 14, la unidad de refrigeración trasfiere aire frío a través de la cámara de aire sobre el panel con PCM para volverlo a congelar. Este proceso requiere aproximadamente 2 horas de refrigeración para recuperar completamente la capacidad de almacenamiento de calor del PCM.

Se encontró que, debido a la introducción del PCM, la carga de refrigeración en horas pico se redujo en un 14,8%, en comparación con el techo convencional sin PCM. Se presentó un aumento en el tiempo de operación del sistema de refrigeración durante la noche; sin embargo, en Japón, el coste de la electricidad fuera de las horas pico es significativamente menor que durante el día. Por lo que, el coste total de electricidad resultó ser 8,4% menor que utilizando placas de techo convencionales de lana de roca.

Ventanas y Persianas

En las edificaciones, se considera que las ventanas son los elementos que presentan el mayor consumo de energía. En climas cálidos dominados por cargas de enfriamiento, la excesiva ganancia de calor solar conlleva a una mayor necesidad de métodos mecánicos de refrigeración. En climas fríos, gran parte de la energía escapa a través de fachadas acristaladas, conduciendo a la necesidad de calefacción mecánica. [20]

Se han desarrollado diversas tecnologías para contrarrestar estos problemas, sin embargo, aún presentan baja inercia térmica y no tienen la capacidad de almacenar el exceso de calor. La introducción de PCM transparentes para su implementación en ventanas representa una oportunidad en este campo.

Un ejemplo es la ventana termodinámica GlassX, producto comercial que en su núcleo posee sales hidratadas como material de cambio de fase sellados herméticamente en envases de policarbonato transparente. Este sistema es capaz de proporcionar una masa térmica equivalente a la de 40 cm de hormigón, logrando una diferencia de temperatura interior entre 4 – 12°C con respecto a la exterior, reduciendo la necesidad de aire acondicionado y desplazando la demanda fuera de las horas pico cuando se necesite. [41]

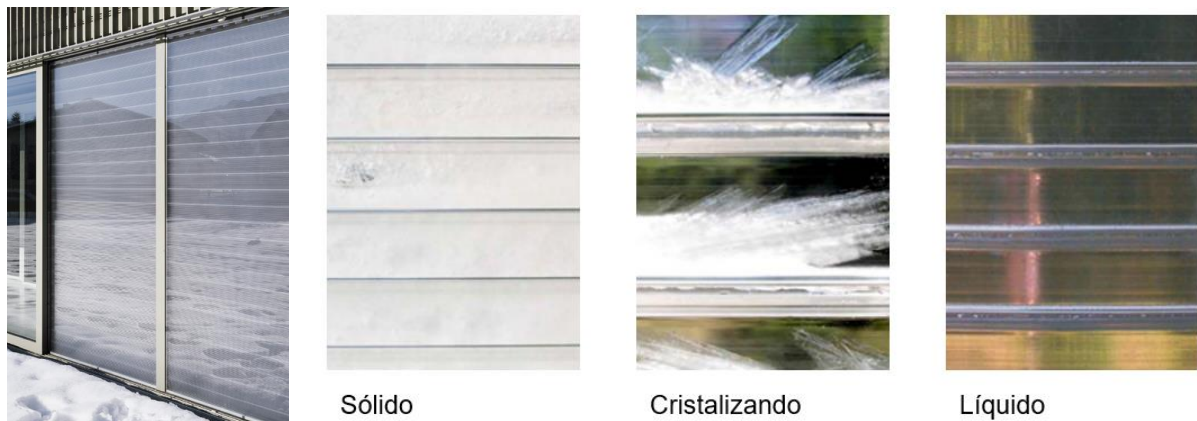


Figura 15. Visibilidad de la ventana GlassX en sus diferentes fases. Fuente: [41]

Las fachadas por lo general, necesitan un sistema de sombreado que permita la captación solar en invierno, pero capaz de bloquear la radiación solar directa en verano. GlassX logra esto por medio de un prisma transparente localizado en el espacio entre los paneles de vidrio exteriores. En los meses de verano cuando el sol está más alto ($> 40^\circ$), el prisma refleja la radiación solar directa, permitiendo que solo pase la luz visible y reduciendo la ganancia de calor solar. En los meses de invierno cuando el sol está más bajo ($< 35^\circ$), el prisma permite una mayor captación solar, casi sin obstáculos, produciendo mayor ganancia solar cuando más se necesita. Esto provoca que el GlassX cuente con un coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC) variable. (Figura 16)

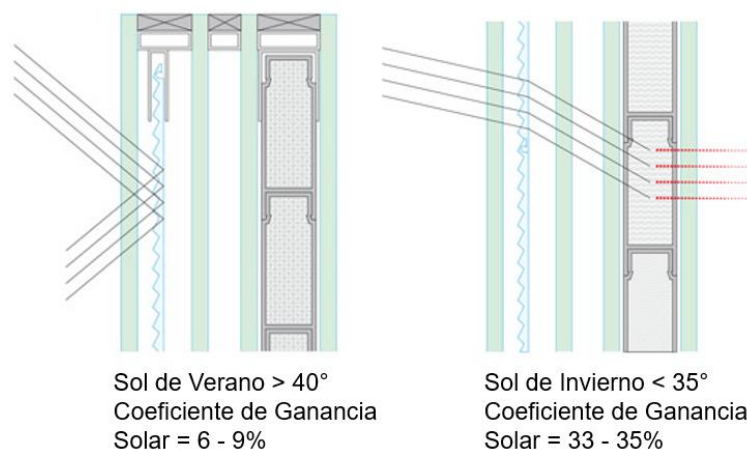


Figura 16. Esquemas de funcionamiento del prisma reflector de la GlassX. Redibujado de [41]

Una solución alternativa para aumentar la inercia térmica y reducir las pérdidas de energía, sin comprometer las propiedades ópticas de la ventana, sería la instalación de persianas con PCM.

Éstas a menudo están hechas de plástico extruido o de perfiles de aluminio rellenos de espuma. Estos mismos perfiles pueden ser utilizados como contenedores de PCM, llenando las cavidades existentes e incluso reemplazando la espuma como material de relleno. De

esta manera, las persianas con PCM pueden ser utilizadas de la misma forma que las persianas convencionales, pero con la capacidad de absorber el exceso de radiación solar cuando sea necesario.

Durante el día, éstas permanecen abiertas, pero aún expuestas a la radiación solar, por lo que el calor es absorbido causando que el PCM se derrita. Por la noche, las persianas están cerradas, se abren las ventanas y el calor almacenado se libera irradiando dentro las habitaciones. [29]

4.3. Integración de los Materiales de Cambio de Fase en el Mobiliario

De acuerdo a lo presentado anteriormente se observa que, los sistemas con PCM más estudiados y disponibles comercialmente son aquellos ubicados en las superficies internas del espacio interior, tales como paneles de pared, falsos techos y pavimentos. Sin embargo, el tema del mobiliario se encuentra muy poco estudiado, a pesar de que puede tener un impacto significativo en la dinámica térmica interior y sobre todo, en el confort de los ocupantes, ya que son los elementos con los que las personas mantienen mayor contacto diario.

Mobiliarios, alfombras y elementos de decoración a menudo se colocan directamente sobre las superficies internas de las habitaciones, produciendo cambios sensibles en los procesos de intercambio de calor, pudiendo afectar el rendimiento de los sistemas de refrigeración y calefacción radiante. [42]

Zhao et al. [43] realizaron cálculos y pruebas de campo que enfatizaron el efecto de sillas y bancos en el rendimiento de los sistemas de refrigeración por suelo radiante, expuestos a una alta carga solar. Estos elementos de mobiliario, pueden opacar la superficie de enfriamiento y producir temperaturas locales en la superficie inferior. Se demostró que la superficie del piso debajo de los bancos fue 3,8 a 7,5 °C más frío que el desprotegido. En consecuencia, el efecto de enfriamiento del suelo radiante cubierto se redujo en un 83% y los riesgos de condensación por humedad aumentaron.

Una encuesta realizada por Johra et al. [42] sobre el contenido interior de los edificios en Dinamarca, proporcionó un estimado de la superficie de mobiliario, paredes, pisos y techos en contacto directo con el aire de una habitación. Se determinó que la superficie del mobiliario puede representar hasta el 50% de la superficie interior de una habitación.

Esta superficie expuesta del mobiliario ofrece un gran potencial para la integración de los materiales de cambio de fase, consiguiendo aumentar la inercia térmica efectiva de edificios ligeros sin ningún tipo de reforma o trabajo de construcción. Sin embargo, existen muy pocos ejemplos de su aplicación en casos reales.

En la competencia “Adream” del año 2010 se presentó el proyecto “Au Frais de Mon Arbre” el cual sugería el uso de parafinas para crear piezas de mobiliario para oficinas. Los PCM se encontraban en el núcleo de espuma entre las dos láminas de aluminio del panel. Se utilizó este material para facilitar la propagación uniforme de la temperatura.

Se llevó a cabo una evaluación de su rendimiento en un edificio de oficinas y se concluyó que la demanda de refrigeración y calefacción puede llegar a ser reducida en un 40% y 34%, respectivamente. [44]



Figura 17. Proyecto "Au Frais de Mon Arbre" para la competencia Adream 2010. [44]

Una solución similar se presentó en el 2015 con la Z.E.F. (Zero Energy Furniture), una mesa que integra un PCM con cambio de fase entre los 21 y 22 °C en medio de una superficie de madera lisa y una lámina plegada de aluminio anodizado. (Figura 18) Los pliegues de la hoja de aluminio, no solo aumentan la conductividad térmica, sino también proveen la rigidez estructural del elemento.

Según los diseñadores, el uso de esta mesa podría ayudar a reducir en un 60% los costes de calefacción y en un 30% los de aire acondicionado. [45]



Figura 18. Imagen y esquema de los componentes de la Z.E.F. [45]

La información referente a ambos casos es muy escasa; no se hace referencia al tipo de PCM, dimensiones del mobiliario ni las condiciones bajo las cuales se realizaron las pruebas en las que se determinó su contribución a la disminución de la demanda de calefacción y refrigeración. Sin embargo, representan el inicio de la exploración de este campo, que hasta ahora ha sido muy poco estudiado.

4.4. Conclusiones

La utilización de materiales de cambio de fase es un tema de creciente interés ya que permite aprovechar la capacidad de almacenamiento de calor latente para absorber y liberar energía cuando sea necesario. Existen numerosos tipos de materiales disponibles y métodos de encapsulación, dando lugar a una gran variedad de combinaciones que pueden ser diseñadas a la medida para adaptarse a cada aplicación.

Ejemplos de su implementación han demostrado sus aportaciones en el desplazamiento de la carga pico, enfriamiento gratuito y control del confort térmico mediante la reducción de las fluctuaciones de temperatura. Sin embargo, existe muy poca documentación orientativa en cuanto a pautas o criterios de implementación utilizando estos materiales, especialmente en cuanto al mobiliario interior; donde se han encontrado escasos ejemplos de su utilización.

A pesar de que estos materiales responden al mismo comportamiento general de absorción y liberación de calor durante el cambio de fase, cada producto comercial presenta características específicas que deben ser estudiadas a la hora de ser utilizados.

Es por esta razón que, en el siguiente capítulo se presenta un estudio experimental que pretende ser una primera evaluación del impacto real de su implementación.

5. ESTUDIO EXPERIMENTAL

5.1. Metodología

Con el fin de analizar el comportamiento térmico de espacios interiores de acuerdo a la introducción de mobiliarios con PCM, se realizaron pruebas comparativas en dos celdas tridimensionales ubicadas en la Escuela de Arquitectura del Valles; las cuales se encontraban expuestas a diferentes ciclos de temperatura ambiental real, durante un período de 17 semanas, con registro de datos cada 30 minutos. Para la obtención de las condiciones ambientales reales en ese periodo de tiempo, se tomaron los datos de la estación meteorológica de Sant Cugat del Vallés.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de todas las fases del estudio, con una descripción de las tareas, sus objetivos, recursos y tiempo requerido.

Aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura
Mabel Moscoso | Octubre 2016

PLANNING ESTUDIO EXPERIMENTAL						
Análisis comparativo del comportamiento térmico de espacios interiores de acuerdo a la introducción de mobiliarios con PCM						
OBJETIVO GENERAL: Evaluar la factibilidad y efectividad de la aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como regulador de temperatura.						
FASE 1: Selección y adecuación de las celdas PAuS						
Descripción de las Tareas	Objetivo	Recursos	Proveedor/ Fabricante	Presupuesto	Tiempo Requerido	Fecha Límite
Revisión y comparación de las características de las diferentes celdas disponibles: dimensiones, soleamiento, buenas condiciones.	Selección de dos celdas (Cp0 - Cp1) con características semejantes para realizar el estudio comparativo en dos espacios en igualdad de condiciones.	Celdas PAuS 0 y 1: Celdas tridimensionales de madera con cerramientos y aislamiento en 5 de sus 6 caras. Celdas cúbicas de 2,20 m de arista	ETSAV	Facilitado por la ETSAV	1 semana	23 de Mayo
Cerramiento de la fachada frontal descubierta de ambas celdas con un material aislante, opaco y reflectante; manteniendo una franja de 40 cm de ancho de polietileno transparente en todo el tramo superior de la fachada, con posibilidad de abrir y cerrar para ventilación y radiación solar.	Crear dos ambientes térmicamente aislados con incidencia controlada de radiación solar y ventilación.	Burbuja de Aluminio Aislante 2 Caras. Ancho 1,2 m	Servei Estació	6,8 €/ml		
		Bobina Polietileno Transparente. Ancho 0,51 m		1,2 €/ml		
		Cinta Adhesiva Tesapack Transparente		3,15 €/ud		
		Ratchet Sin Fin 5 m. 25 mm		5,60 €/ud		
FASE 2: Verificación de la idoneidad de las celdas PAuS						
Prueba 1 - Aire vs. Aire						
Descripción de las Tareas	Objetivo	Recursos	Proveedor/ Fabricante	Presupuesto	Tiempo Requerido	Fecha Límite
Registro de mediciones de la temperatura interior de cada celda en un intervalo de 30 minutos durante 6 días y su comparación con las condiciones ambientales reales durante ese periodo. Colocación de un datalogger con dos sensores de medición de temperatura en cada celda: el primero en el centro del suelo de la celda y el segundo a 1m de altura sobre el primero. - Si los resultados son los esperados, se pasará a la definición del modelo de mobiliario. - Si los resultados no son los esperados, debido a temas de aislamiento o infiltraciones, se modificará el cerramiento y se realizarán nuevas pruebas. Si es causado por diferencias en la captación de radiación solar a diferentes horas del día, se determinarán esas horas y se excluirán a la hora de hacer las comparaciones.	Garantizar el funcionamiento similar de las celdas PAuS 0 y 1.	Celdas PAuS 0 y 1	ETSAV	Facilitado por la ETSAV	3 semanas	1 de Junio
		Datalogger Testo 177-T4 + Sondas de Medición	Testo	Facilitado por la ETSAV		
		Datos obtenidos EMA - Sant Cugat del Vallés - CAR	Servei Meteorològic de Catalunya	Obtención gratuita vía web		
FASE 3: Selección del Material de Cambio de Fase						
Descripción de las Tareas	Objetivo	Recursos	Proveedor/ Fabricante	Presupuesto	Tiempo Requerido	Fecha Límite
Revisión de diferentes tipos de PCM disponibles comercialmente y selección de dos productos (podría ser uno más o uno menos) según los siguientes criterios: disponibilidad local, ventana térmica de funcionamiento, capacidad de almacenamiento, vida útil, formato, compatibilidad con otros materiales, expansión de volumen por cambio de fase.	Selección del material más adecuado para ser integrado en el mobiliario de pruebas.	Micronal PCM	BASF	6 - 8 €/kg	3 semanas	27 de Abril
		PCM – SP / RT	RUBITHERM	9 €/kg		
		CrodaTherm	Croda Ibérica	5 - 7 €/kg		
FASE 4: Diseño y fabricación del mobiliario de prueba						
Descripción de las Tareas	Objetivo	Recursos	Proveedor/ Fabricante	Presupuesto	Tiempo Requerido	Fecha Límite
Fabricación de dos piezas de mobiliario, desmontables, aptas para ser utilizadas tanto en horizontal como vertical y con la posibilidad de agregarles más o menos cantidad de PCM.	Fabricación de un mobiliario adaptable a las diferentes pruebas de acuerdo a las hipótesis planteadas.	Plancha fibrapan DM 1200x600x9 mm	Servei Estació	10,40 €/ud	2 semanas	1 de Junio
		Cola blanca rápida para madera	Servei Estació	1,48 €/ud		
		Caballote de madera de pino 750x750 mm	Servei Estació	6,8 €/ud		
FASE 5: Análisis del Comportamiento Térmico						
Prueba 2 - PCM RT21 vs. Aire						
Descripción de las Tareas	Objetivo	Recursos	Proveedor/ Fabricante	Presupuesto	Tiempo Requerido	Fecha Límite
1. Colocación del mobiliario con 6,00 kg de PCM RT21 en la primera celda (Cp0) y la segunda (Cp1) se dejará vacía. 2. Ubicar de un datalogger con dos sensores de medición de temperatura en cada celda: el primero en el centro del suelo de la celda y el segundo a 1m de altura sobre el primero. 3. Registro de mediciones de la temperatura interior de cada celda en un intervalo de 30 minutos durante 4 días. 4. Comparación de estas mediciones entre sí y con respecto a las condiciones ambientales reales durante ese periodo de tiempo.	Evidenciar los cambios en el comportamiento térmico de un espacio vacío con la introducción de un mobiliario con PCM.	Celdas PAuS 0 y 1	ETSAV	Facilitado por la ETSAV	4 días	17 de Junio
		Datalogger Testo 177-T4 + Sondas de Medición	Testo	Facilitado por la ETSAV		
		Datos obtenidos EMA - Sant Cugat del Vallés - CAR	Servei Meteorològic de Catalunya	Obtención gratuita vía web		
		Mobiliario	Mabel M.	40 €		
		Paneles CSM - 6 kg PCM RT21	RUBITHERM	Facilitado Grupo LITA		
Prueba 3 - PCM RT21 vs. Agua						
Descripción de las Tareas	Objetivo	Recursos	Proveedor/ Fabricante	Presupuesto	Tiempo Requerido	Fecha Límite
1. Colocación del mobiliario con 6,00 kg de PCM RT21 en la primera celda (Cp0) y la segunda (Cp1) se colocarán 25 litros de agua envasados en botellas de 2 litros. 2. Ubicar un datalogger con dos sensores de medición de temperatura en cada celda: el primero en el centro del suelo de la celda y el segundo a 1m de altura sobre el primero. 3. Registro de mediciones de la temperatura interior de cada celda en un intervalo de 30 minutos durante 4 días. 4. Comparación de estas mediciones entre sí y con respecto a las condiciones ambientales reales durante ese periodo de tiempo.	Comparación del comportamiento térmico del PCM con respecto a cantidad de agua con igual capacidad térmica.	Celdas PAuS 0 y 1	ETSAV	Facilitado por la ETSAV	4 días	21 de Junio
		Datalogger Testo 177-T4 + Sondas de Medición	Testo	Facilitado por la ETSAV		
		Datos obtenidos EMA - Sant Cugat del Vallés - CAR	Servei Meteorològic de Catalunya	Obtención gratuita vía web		
		Mobiliario	Mabel M.	40 €		
		Paneles CSM - PCM RT21	RUBITHERM	Facilitado Grupo LITA		
		Botellas de Agua de 2 litros	Mercadona	0,25 €/ud		
Prueba 4 - PCM RT21 Horizontal vs. PCM RT21 Vertical						
Descripción de las Tareas	Objetivo	Recursos	Proveedor/ Fabricante	Presupuesto	Tiempo Requerido	Fecha Límite
1. Colocación de un módulo horizontal de mobiliario con 3,00 kg de PCM RT21 en la primera celda (Cp0) y en la segunda (Cp1), un módulo vertical con la misma cantidad de PCM RT21. 2. Ubicar un datalogger con dos sensores de medición de temperatura en cada celda: el primero en el centro del suelo de la celda y el segundo a 1m de altura sobre el primero. 3. Registro de mediciones de la temperatura interior de cada celda en un intervalo de 30 minutos durante 6 días. 4. Comparación de estas mediciones entre sí y con respecto a las condiciones ambientales reales durante ese periodo de tiempo.	Determinar la ubicación más favorable dentro del mobiliario para el óptimo funcionamiento de los PCM: en posición horizontal o vertical.	Celdas PAuS 0 y 1	ETSAV	Facilitado por la ETSAV	4 días	26 de Junio
		Datalogger Testo 177-T4 + Sondas de Medición	Testo	Facilitado por la ETSAV		
		Datos obtenidos EMA - Sant Cugat del Vallés - CAR	Servei Meteorològic de Catalunya	Obtención gratuita vía web		
		Mobiliario	Mabel M.	40 €		
		Paneles CSM - PCM RT21	RUBITHERM	Facilitado Grupo LITA		
Prueba 5 - PCM RT21 vs. PCM SP21E						
Prueba 5.1: Sin Ventilación						
Descripción de las Tareas	Objetivo	Recursos	Proveedor/ Fabricante	Presupuesto	Tiempo Requerido	Fecha Límite
1. Colocación de un componenete horizontal de mobiliario con 6 kg de PCM RT21 solidificado en la Cp0 y 6 kg de PCM SP21E solidificado en un componente horizontal en la Cp1. Ninguna de las celdas cuenta con ventilación. 2. Registro de mediciones de la temperatura interior de la celda en un intervalo de 30 minutos durante 37 horas. 3. Comparación de estas mediciones entre sí y con respecto a las temperaturas ambiente durante ese periodo de tiempo.	Determinar qué tipo de PCM funciona mejor; el PCM RT21 (material orgánico con un solo punto de cambio de fase) o el PCM SP21E (material inorgánico con los puntos de fusión y solidificación diferentes) y cómo afecta el estado del PCM y la ventilación en el comportamiento térmico.	Celdas PAuS 0 y 1	ETSAV	Facilitado por la ETSAV	37 horas	30 de Junio
		Datalogger Testo 177-T4 + Sondas de Medición	Testo	Facilitado por la ETSAV		
		Datos obtenidos EMA - Sant Cugat del Vallés - CAR	Servei Meteorològic de Catalunya	Obtención gratuita vía web		
		Mobiliario	Mabel M.	40 €		
		Paneles CSM - PCM RT21	RUBITHERM	Facilitado Grupo LITA		
		Paneles CSM - PCM SP21E	RUBITHERM			
Prueba 5.2: Con Ventilación						
Descripción de las Tareas	Objetivo	Recursos	Proveedor/ Fabricante	Presupuesto	Tiempo Requerido	Fecha Límite
1. Colocación de un componenete horizontal de mobiliario con 6 kg de PCM RT21 en estado líquido en la Cp0 y 6 kg de PCM SP21E en estado líquido en un componente horizontal en la Cp1. Ambas celdas cuentan con ventilación. 2. Registro de mediciones de la temperatura interior de la celda en un intervalo de 30 minutos durante 37 horas. 3. Comparación de estas mediciones entre sí y con respecto a las temperaturas ambiente durante ese periodo de tiempo.	Determinar qué tipo de PCM funciona mejor; el PCM RT21 (material orgánico con un solo punto de cambio de fase) o el PCM SP21E (material inorgánico con los puntos de fusión y solidificación diferentes) y cómo afecta el estado del PCM y la ventilación en el comportamiento térmico.	Celdas PAuS 0 y 1	ETSAV	Facilitado por la ETSAV	37 horas	2 de Julio
		Datalogger Testo 177-T4 + Sondas de Medición	Testo	Facilitado por la ETSAV		
		Datos obtenidos EMA - Sant Cugat del Vallés - CAR	Servei Meteorològic de Catalunya	Obtención gratuita vía web		
		Mobiliario	Mabel M.	40 €		
		Paneles CSM - PCM RT21	RUBITHERM	Facilitado Grupo LITA		
		Paneles CSM - PCM SP21E	RUBITHERM			
				Total Duración del Proyecto:	17 semanas	

Tabla 3. Planning estudio experimental

5.2. Contexto General del Estudio

5.2.1 Emplazamiento. Celdas PAUS. ETSAV, Sant Cugat del Vallés.

Se utilizarán dos celdas de las cinco que fueron facilitadas por la Plataforma de Arquitectura y Sostenibilidad (PAuS) [46]. Éstas se encuentran en el patio de la ETSAV, en la planta baja, donde solo una de sus caras recibe radiación solar directa. (Figura 19)



Figura 19. Patio de la ETSAV con la ubicación de las celdas. Fuente: Google Earth, foto: Mabel Moscoso.

Cada celda es cúbica con 2,20 m de arista. Cinco de las seis caras de estas cajas, están construidas con paneles de madera tipo OSB de 22mm de espesor y forradas interiormente por 20 cm de aislamiento térmico de fibras de madera GÚTEX (landa $\lambda = 0,045 \text{ w / m}^2\text{K}$)

Las juntas constructivas entre los paneles de madera se encuentran selladas con bandas adhesivas que impiden el paso del aire y garantizan una adecuada estanqueidad a las infiltraciones, además de estar rellenas con aislante de lana de oveja, para mantener una transmitancia homogénea en toda la cara. (Figura 20)

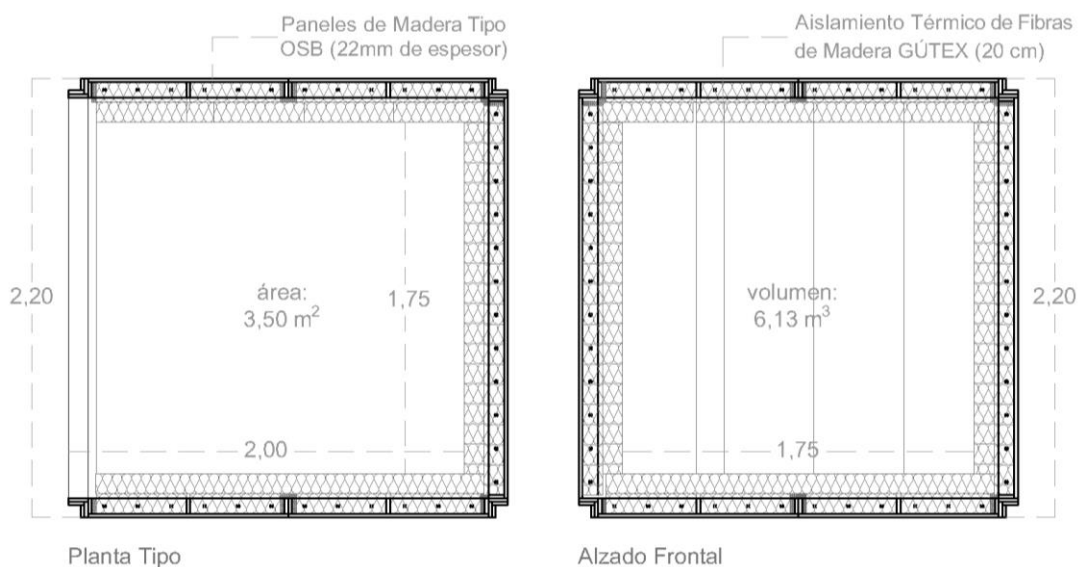


Figura 20. Planos de la Celda tipo. Fuente: PAuS

5.2.2. EMA Sant Cugat del Vallès – CAR. Servicio Meteorológico de Cataluña.

Para la obtención de las condiciones ambientales reales en el periodo de prueba, se tomaron los datos de la estación meteorológica de Sant Cugat del Valles. [47] Se debe destacar que, a pesar de que esta es la estación más próxima a la escuela, se encuentra a 1,64 km de distancia (Figura 21), por lo que las lecturas pudieran variar de alguna forma con respecto a las condiciones ambientales reales en la escuela.



Figura 21. Ubicación EMA Sant Cugat en relación a la ETSAV. Fuente: Google Earth.

5.3. Materiales Empleados

5.3.1. Paneles CSM



Los paneles CSM de la compañía alemana Rubitherm Technologies GmbH, son un tipo de macro-encapsulación de PCM en formato de 450 x 300 mm con 15 mm de espesor. Están compuestos por dos placas de aluminio, conectadas entre sí a través de un marco del mismo material. El aluminio garantiza una alta transferencia de calor y por otro lado, poca corrosividad. Esta consistencia contra la corrosión se ve reforzada por una capa adicional de un material anticorrosivo en el interior y exterior del panel. Es posible personalizar estos paneles para adaptarse a diferentes aplicaciones, ya que pueden ser rellenos tanto con PCM orgánicos como inorgánicos, con un amplio rango de temperaturas entre 0 y 45 °C, dependiendo del uso y requisitos particulares. [48]

La cantidad de PCM capaz de almacenar, depende del espesor del panel, así como del tipo de PCM; tal como se muestra en la Tabla 4. Para las pruebas realizadas, se utilizaron dos tipos de relleno: PCM orgánico RT21 y PCM inorgánico SP21E.

		Peso de Relleno	Capacidad de Almacenamiento	Peso de Relleno	Capacidad de Almacenamiento
	Espesor	Relleno de SP	ej. SP21E; 160KJ/kg	Relleno de RT	ej. RT21; 155KJ/kg
CSM 5/5	10 mm	1 kg	44 Wh	0,5 kg	21,5 Wh
CSM 10/5	15 mm	2 kg	88 Wh	1 kg	43 Wh

Tabla 4. Capacidad de almacenamiento Paneles CSM de acuerdo al tipo de PCM. Información traducida de [48]

5.3.2. PCM RT21



Los PCM establecidos de la categoría RT son materiales orgánicos, químicamente inertes y tienen una vida útil ilimitada. Debido a su pureza y composición específica, este material muestra una notable capacidad de calor latente en estrechos rangos de temperatura. La particularidad de este tipo de PCM es que presentan una sola temperatura de cambio de fase. En el caso del PCM RT21, se fusiona y solidifica dependiendo si la temperatura ambiente es superior o inferior a 22 °C. Las características específicas de este material se presentan en la Tabla 5. [49]

Ficha Técnica RT21		
	Valores Típicos	
Área de Fusión	18-23	[°C]
	Pico Principal: 21	
Área de Solidificación	22-19	[°C]
	Pico Principal: 22	
Capacidad de Almacenamiento de Calor $\pm 7,5$ %	155	[KJ/kg]
Combinación de calor sensible y latente en un rango de temperatura entre 13-28 °C	43	[Wh/kg]
Capacidad de Calor Específico	2	[KJ/kg*K]
Densidad Sólido a 15 °C	0,88	[kg/l]
Densidad Líquido a 25 °C	0,77	[kg/l]
Conductividad Térmica (Ambas Fases)	0,2	[W/(m*K)]
Expansión de Volumen	12,5	[%]
Flash Point (PCM)	140	[°C]
Temperatura Máxima Operacional	40	[°C]

Tabla 5. Ficha técnica PCM RT21. Información traducida de [49]

5.3.3. PCM SP21E



Los PCM establecidos de la categoría SP son materiales inorgánicos. En comparación con los PCM – RT, los del tipo SP tienen una ventana térmica mucho más amplia, donde su temperatura de fusión es diferente a su temperatura de solidificación. Para el caso del PCM SP21E, su punto de fusión es a 22 °C, mientras que su punto de solidificación se produce a temperaturas más bajas entre los 19 y 20 °C. [50] Las características específicas de este material se presentan en la Tabla 6.

Ficha Técnica SP21E	
	Valores Típicos
Área de Fusión	22-23 [°C] Pico Principal: 22
Área de Solidificación	21-19 [°C] Pico Principal: 21
Capacidad de Almacenamiento de Calor $\pm 7,5$ % Combinación de calor sensible y latente en un rango de temperatura entre 13-28 °C	160 [KJ/kg] 44 [Wh/kg]
Capacidad de Calor Específico	2 [KJ/kg*K]
Densidad Sólido a 15 °C	1,5 [kg/l]
Densidad Líquido a 35 °C	1,4 [kg/l]
Conductividad Térmica	0,6 [W/(m*K)]
Expansión de Volumen	3-4 [%]
Temperatura Máxima Operacional	45 [°C]
Corrosividad	Efecto corrosivo en metales

Tabla 6. Ficha técnica PCM SP21E. Información traducida de [50]

5.4. Instrumentación y Equipo de Mediciones

Todos los instrumentos utilizados, así como el software y equipos auxiliares para descargar los datos recolectados por las sondas, son de la firma TESTO.

- Data Loggers:

Modelo testo 177-T4 de 2 líneas, 4 canales de temperatura externos. Rango de funcionamiento de -100 a + 400°C tipo T. Capacidad de memoria 48.000 lecturas por canal.

- Canales de Medición:

Los tipos de canales utilizados son de hilo termopolar tipo K (NiCr-Ni) flexible, fibra de vidrio, Ø1.5 mm. Rango de temperaturas -100 a + 400°C. Longitud de sonda 1500mm.

- Recolector de Datos:

Recolector de datos Testo 0554 1765 para interfaz USB, incluye soporte para los Data Loggers 175/177. Capacidad de memoria: 1 MB.

- Software ComSoft Basic 5:

Software básico para la programación y lectura de los Data Loggers Testo 174 / 175 / 176 / 177; presentación de los valores en forma de gráfica y tabla, al igual que distintas funciones de exportación.

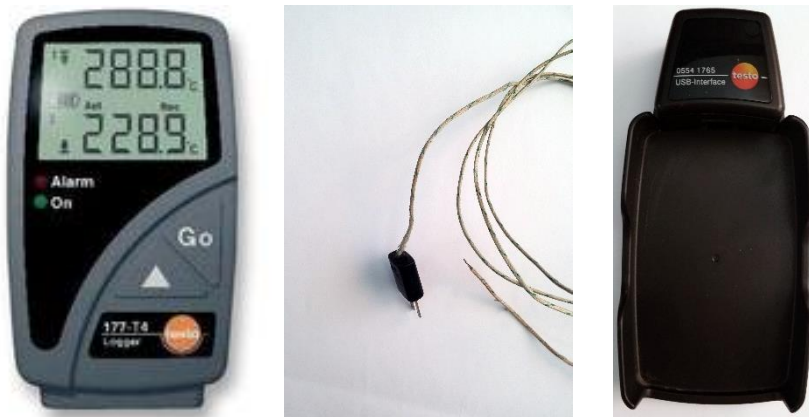


Figura 22. De izquierda a derecha: Data Logger modelo testo 177-T4, canales de hilo termopolar tipo K y recolector de datos Testo 0554 1765.

5.5. Desarrollo

Fase 1. Selección y adecuación de las Celdas PAuS.

Se seleccionan como Cp0 y Cp1 aquellas celdas, que se encuentran en mejores condiciones, ubicadas una al lado de la otra y con el mayor soleamiento; de modo que la incidencia solar dentro de las celdas pueda ser regulada en caso que fuese necesario.

Para la adecuación de las celdas seleccionadas, se instala un cerramiento en la fachada frontal descubierta de ambas con material de burbuja de aluminio aislante de dos caras; manteniendo una franja removible de 40 cm de ancho de polietileno transparente en todo el tramo superior. De esta forma se crean dos ambientes térmicamente aislados con incidencia controlada de radiación solar y ventilación. (Figura 23)

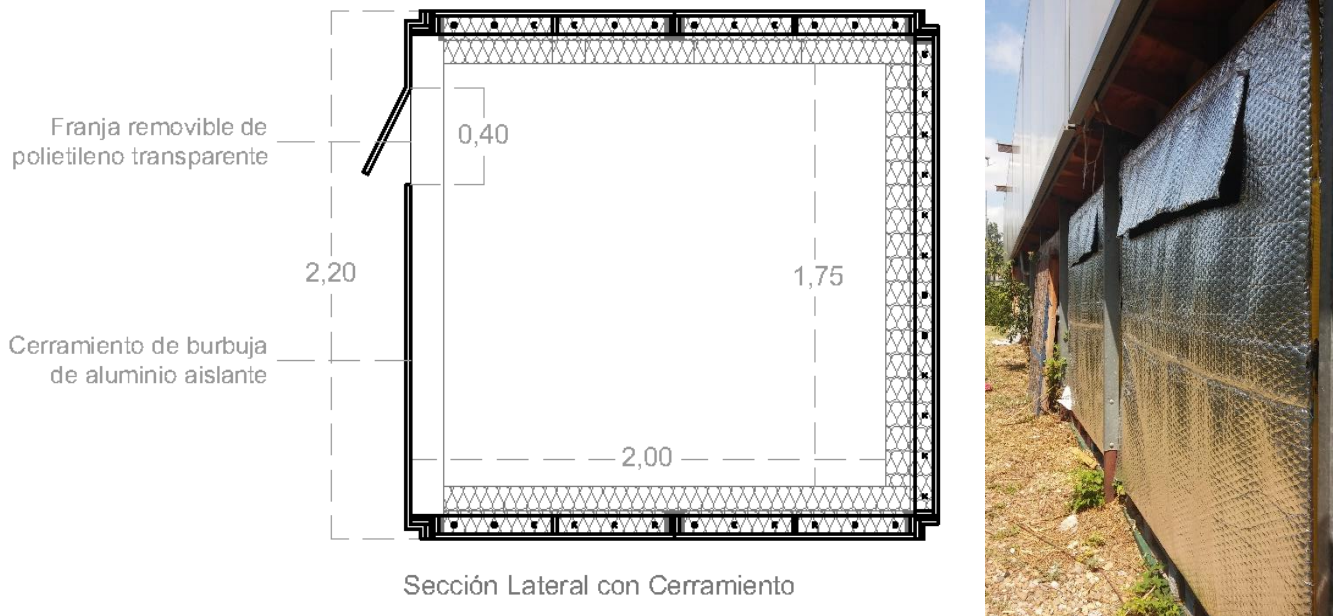


Figura 23. Definición cerramiento de fachada principal.

El esquema propuesto para recolectar los datos térmicos se basa en colocar dos canales de medición de temperatura en cada celda: el canal 1 se coloca en el centro del suelo de la celda y el canal 2, a 1,00 m de altura sobre el primero. (Figura 24) Éstos, que están colocados de forma idéntica en cada celda, se encargarán de enviar los datos a un recolector (Data Logger), que los almacenará y mediante el software de ComSoft, se visualizarán diagramas y tablas a partir de los datos recolectados, que podrán ser exportados a otros softwares para su interpretación.

Los canales se encuentran dentro de un envase plástico abierto en la parte inferior y envuelto en material reflexivo, para tomar la temperatura del aire interior sin verse afectada por la radiación solar.



Figura 24. Localización de canales y data loggers dentro de la Cp0 y Cp1.

Fase 2. Verificación de la idoneidad de las celdas.

Prueba 1: Aire vs. Aire

Objetivo: Verificar la idoneidad de las celdas y garantizar que ambas presentan un comportamiento térmico similar.

Condiciones: Ambas celdas se encuentran vacías, sin ventilación ni radiación solar directa en el interior. Se registra la temperatura interior de cada celda en un intervalo de 30 minutos y se toman los datos ambientales reales de la base de datos del Servicio Meteorológico de Cataluña.

- Semana 1.

Fecha: 01/05/2016 – 06/05/2016

Duración: 6 días

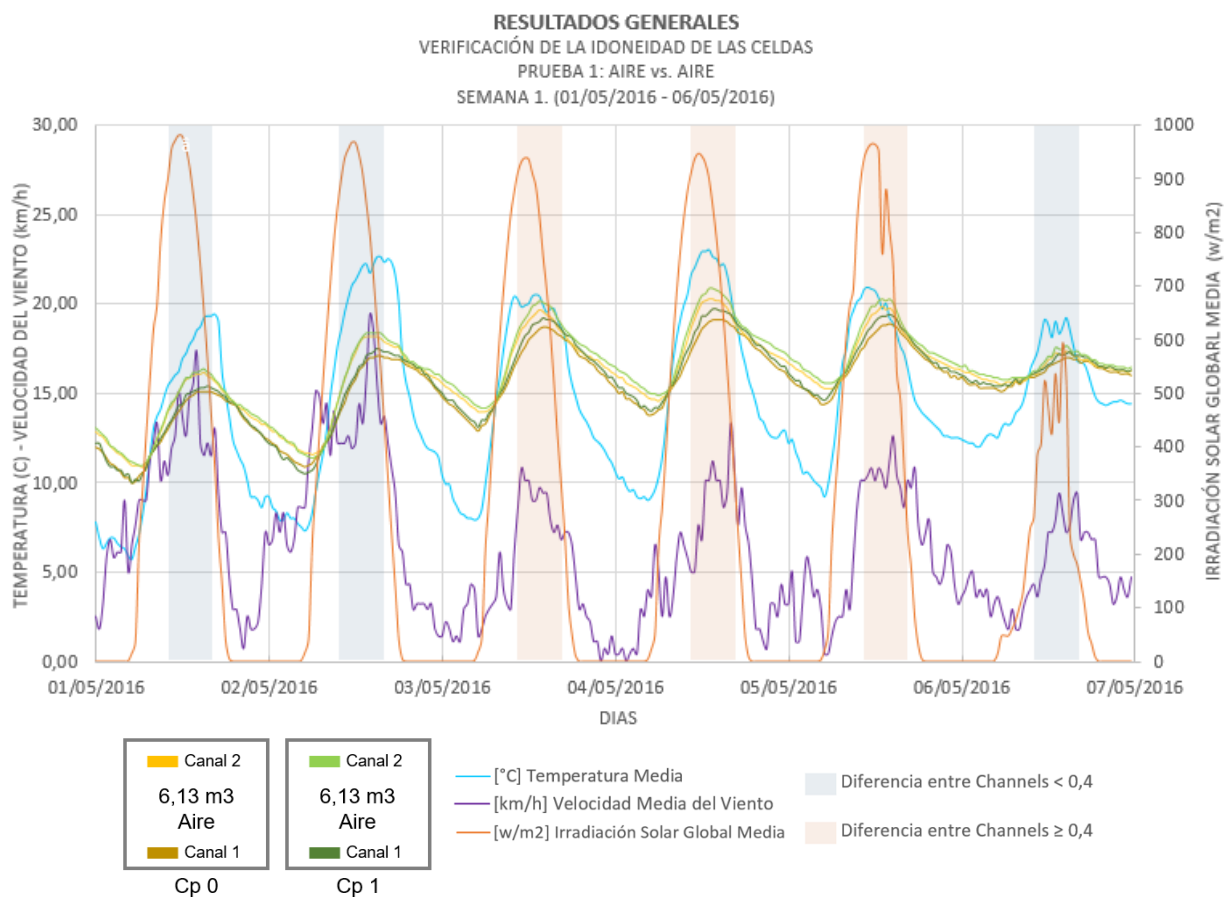


Figura 25. RESULTADOS GENERALES. Verificación de la Idoneidad de las Celdas. Prueba 1: Aire vs. Aire. Semana 1 (01/05/2016 – 06/05/2016)

Observaciones:

- La temperatura interior oscila de acuerdo a la temperatura exterior. Ya que el aire caliente es menos denso que el frío, se acumula en la parte superior de la celda, causando que la temperatura de los canales 2, sea constantemente más elevada que la registrada por los canales 1 colocados en el suelo.
- Las diferencias absolutas entre los canales fueron mayores a 0,30 en un periodo muy concreto entre las 10h - 16h los días 3, 4 y 5 de Mayo. Aquí, la temperatura exterior

se mantiene sobre los 20°C, la irradiación solar global sobrepasa los 850 w/m² y la velocidad del viento mantiene niveles bajos entre los 10 – 12 km/h.

- En los demás días donde las diferencias absolutas fueron menores, se observa que tanto la temperatura exterior como la irradiación solar global mantuvieron valores similares a los días 3, 4 y 5 de Mayo. Sin embargo, la velocidad del viento fue mayor, alcanzando hasta 19,40 km/h.

A partir de estas observaciones, se puede asumir que la mayor diferencia de temperatura ocurre durante las horas pico, donde la irradiación solar es mayor, mientras que la velocidad del viento es considerablemente menor. Al aumentar la velocidad del viento, se producen infiltraciones dentro de las celdas, disipando el calor interior y disminuyendo las diferencias de temperatura. Como solución, se refuerza el cerramiento mediante unos tirantes perimetrales que al tensarse, sellan todos los bordes contra posibles infiltraciones. Una vez hecho esto, se realiza nuevamente la Prueba 1 durante dos periodos de seis días para comprobar y garantizar la idoneidad de ambas celdas.

- Semana 2.

Fecha: 11/05/2016 – 16/05/2016

Duración: 6 días

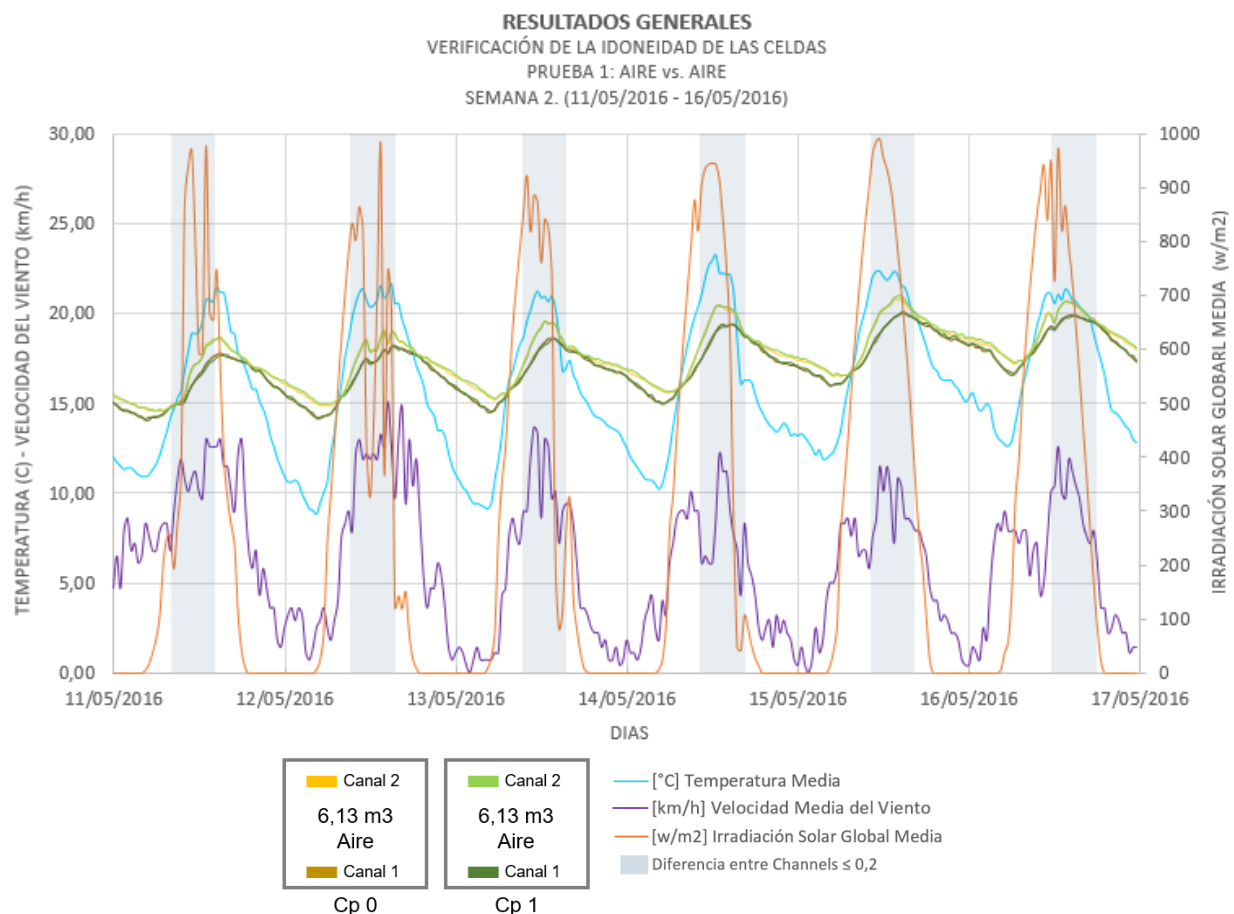


Figura 26. RESULTADOS GENERALES. Verificación de la Idoneidad de las Celdas. Prueba 1: Aire vs. Aire. Semana 2 (11/05/2016 – 16/05/2016)

En la Figura 26 se encuentra sombreado el periodo entre las 10h y 16h de cada día, donde en la primera prueba se presentaba la mayor diferencia absoluta de temperatura al interior de

las celdas. Sin embargo, con las modificaciones de la fachada, se logra mantener una diferencia absoluta máxima de 0,2.

Como se observa, la irradiación solar máxima permanece por encima de los 900 w/m² e incluso en los momentos donde la velocidad del viento no supera los 11,50 km/h (día 15/05/2016), las diferencias máximas se encuentran dentro del rango aceptable.

- Semana 3.
Fecha: 26/05/2016 – 31/05/2016
Duración: 6 días

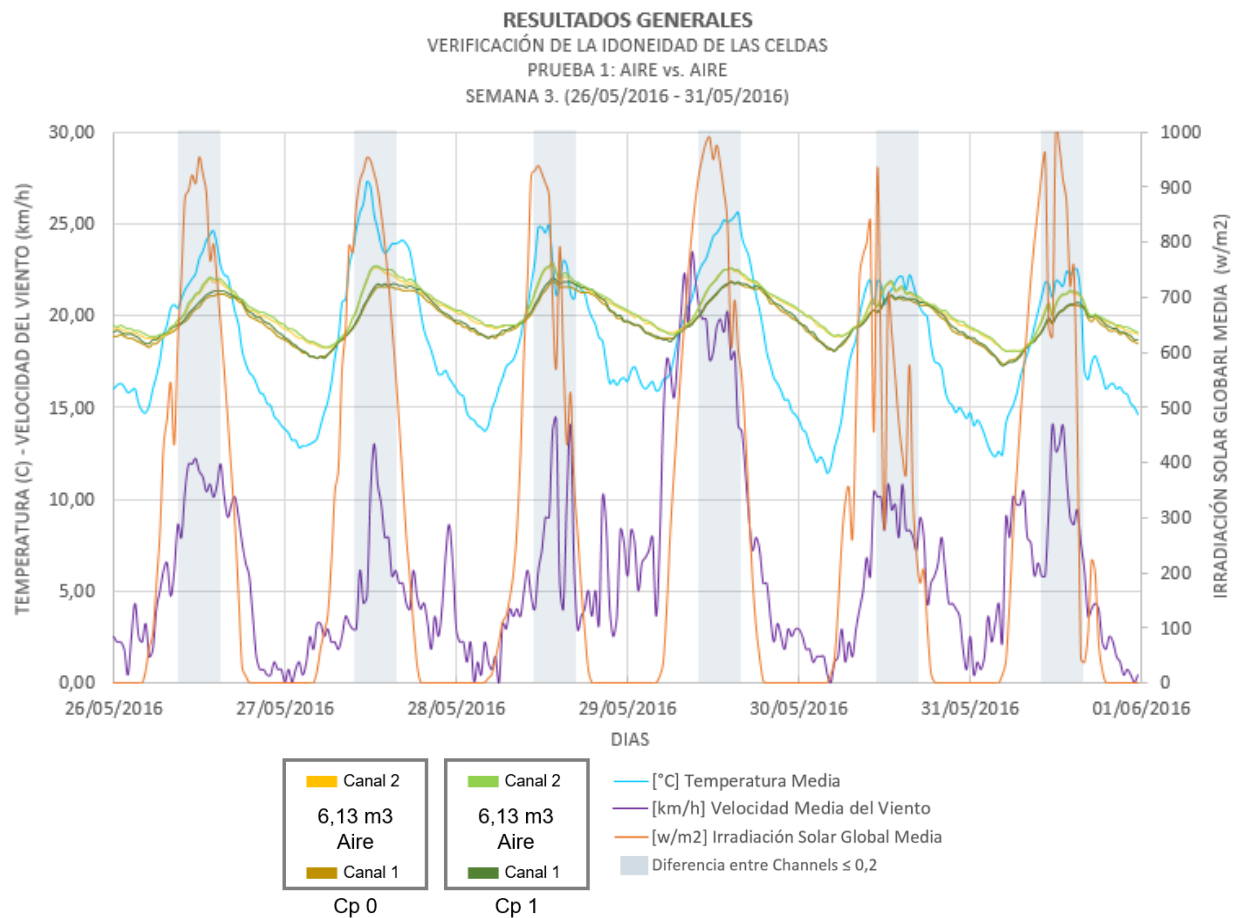


Figura 27. RESULTADOS GENERALES. Verificación de la Idoneidad de las Celdas. Prueba 1: Aire vs. Aire. Semana 3 (26/05/2016 – 31/05/2016)

En esta tercera semana, se obtienen los mismos resultados que en la semana anterior. Las diferencias absolutas entre los sensores de las celdas Cp1 y Cp2 al interior de la celda no superan los 0,2, a pesar de que en las horas pico del día, la temperatura exterior se mantiene por encima de los 20°C, irradiación solar global que sobrepasa los 950 w/m² y velocidad del viento que no sobrepasa los 15 km/h en cinco de los seis días de prueba.

En base a estos resultados, se comprueba que ambas celdas presentan un comportamiento térmico similar y que las pruebas a realizar actuarán bajo las mismas condiciones.

Fase 3. Selección del Material de Cambio de Fase

Se realiza una revisión y comparación de diferentes tipos de PCM disponibles comercialmente, según los criterios de disponibilidad local, ventana térmica de funcionamiento, capacidad de almacenamiento, formato y compatibilidad con otros materiales.

Se seleccionan dos PCM de la compañía Rubitherm [27]: el RT21 y el SP21E (ver puntos 5.3.2. – 5.3.3.), con el fin de comparar el comportamiento térmico de un material orgánico con un solo punto de cambio de fase con un material inorgánico con una ventana térmica más amplia y determinar cuál es el más apropiado para su aplicación en el mobiliario interior.

Se eligen los PCM con un cambio de fase entre 19 – 23 °C. De acuerdo a lo estudiado en el estado del arte, en los ejemplos de la integración de los PCM en la edificación y mobiliario interior, se utilizaron en su mayoría PCM con una ventana térmica entre 21 - 23°C. (ver puntos 4.2.3. – 4.3.)

Además, tal como se observa en la Figura 28, durante las tres semanas de prueba para la verificación de la idoneidad de las celdas, la temperatura exterior en el 95% de los casos no supera los 23°C, valores correspondientes a condiciones de invierno. Con lo cual, de acuerdo a lo establecido en el RITE (ver punto 3.4.) para obtener condiciones de confort en invierno, la temperatura operativa debe mantenerse entre los 21 – 23 °C, que se encuentra dentro de la ventana térmica de estos PCM.

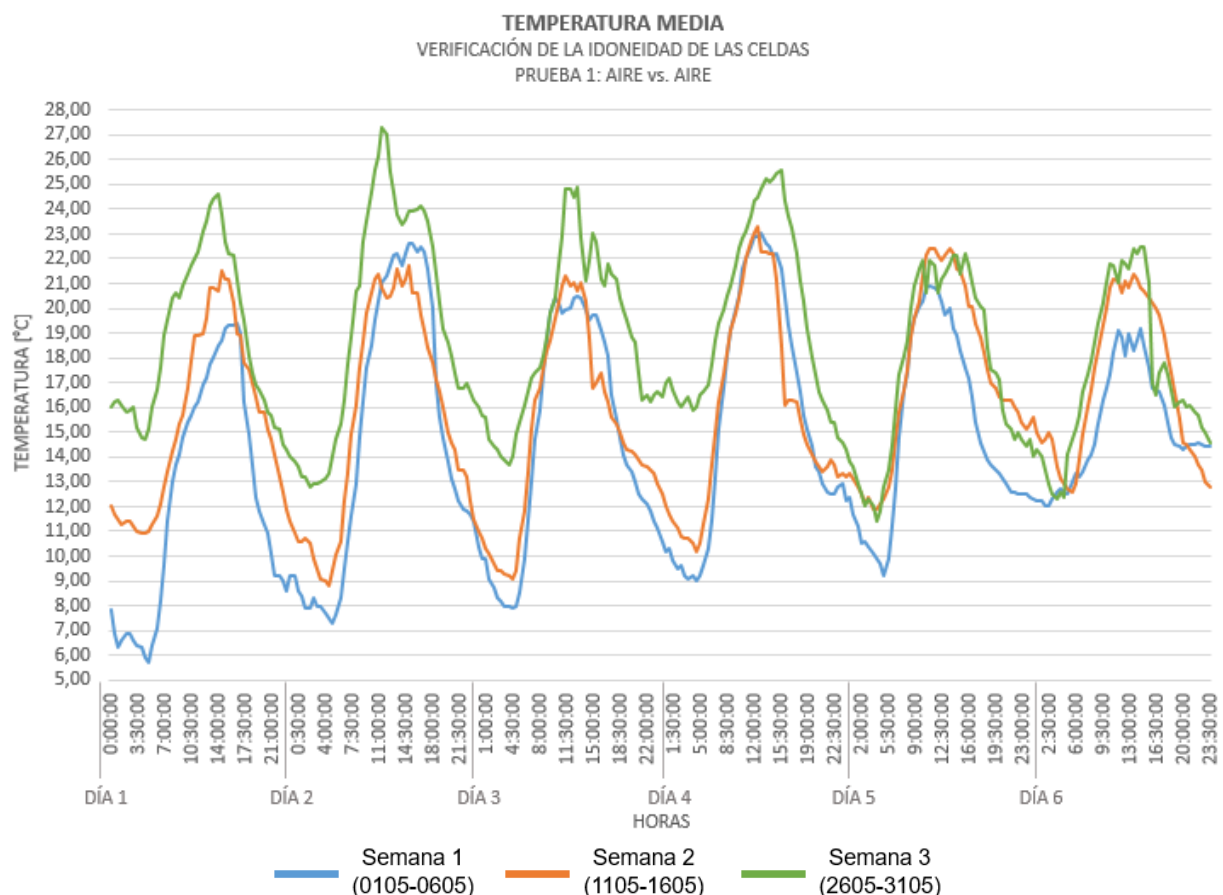


Figura 28. Temperatura media durante las tres semanas de prueba. Verificación de la idoneidad de las celdas. Prueba 1: Aire vs. Aire.

De acuerdo a BASF [51], la cantidad necesaria de PCM está relacionada con la superficie de piso y debe ser suficiente para almacenar aproximadamente 300 KJ/m². Tomando esto en cuenta, ya que los PCM seleccionados son capaces de almacenar 155 - 160 KJ/m², se determina que son necesarios cerca de 6 kg de PCM para empezar a llevar a cabo las pruebas.

En cuanto al formato, se utiliza la macro-encapsulación mediante paneles CSM de aluminio, (ver punto 5.3.1.) para mayor conductividad y manejo del material, facilitando la posibilidad de agregar más o menos material según sea conveniente en cada prueba.

Fase 4. Fabricación del mobiliario de prueba.

Los principales componentes del mobiliario de prueba son dos piezas iguales de 0,50 x 0,75 x 0,10 m hechos de planchas DM de 10 mm de espesor. Estos fueron diseñados bajo los siguientes criterios:

- Ser desmontables.
- Posibilidad de utilizarse en horizontal como en vertical.
- Generar mayor contacto entre el aire y los paneles CSM para facilitar la convección.
- Permitir agregarles más o menos paneles con PCM.

De manera que un mismo mobiliario pueda ser adaptado a las diferentes pruebas de acuerdo a las hipótesis planteadas.

Estos dos componentes, dispuestos uno en horizontal y otro en vertical, en conjunto con un caballete de madera de pino de 0,75 m de altura, conforman el mobiliario de prueba. (Figura 29)

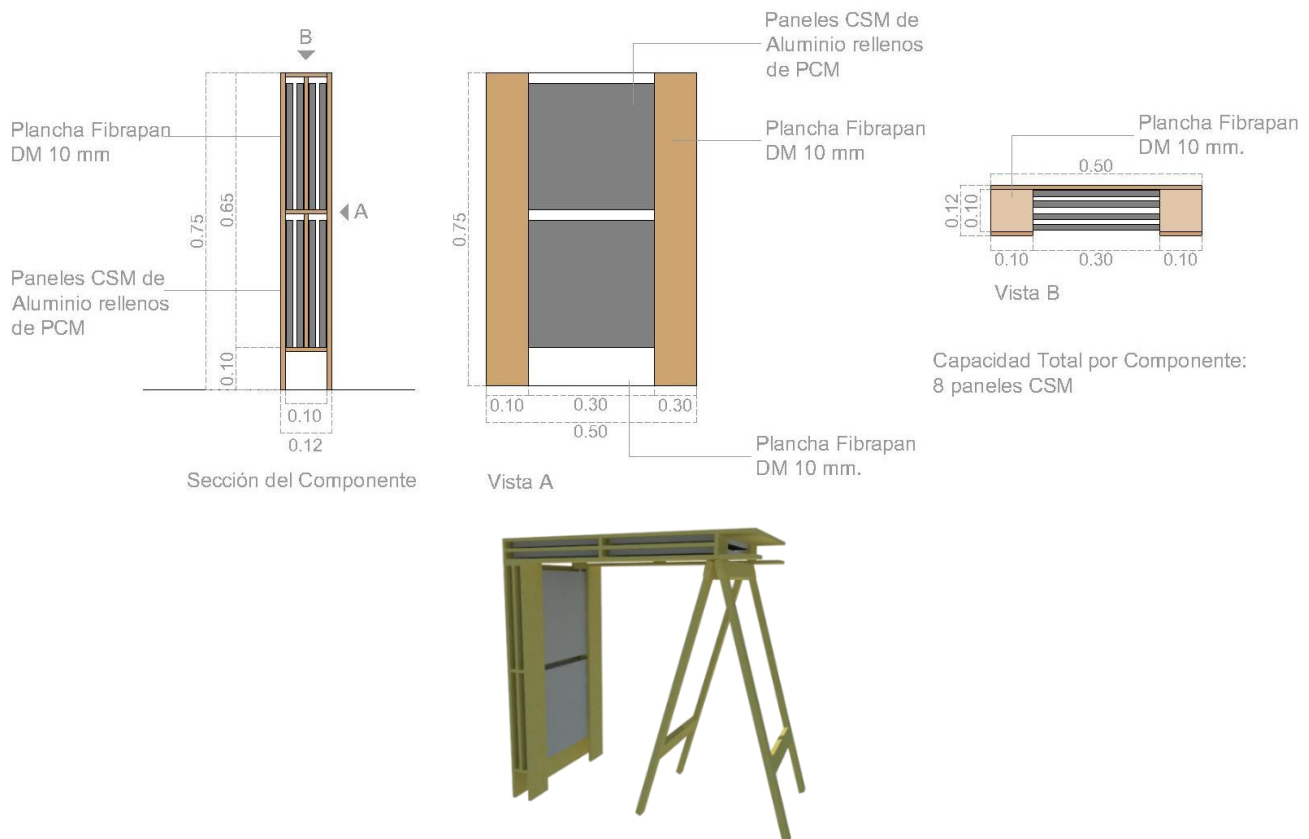


Figura 29. Vista del mobiliario de pruebas y detalles del componente principal.

Fase 5. Análisis del comportamiento térmico.

En esta fase de experimentación se llevan a cabo distintas pruebas con el objetivo de analizar el comportamiento de los PCM y determinar las pautas para optimizar su funcionamiento de acuerdo a distintos escenarios posibles y condiciones ambientales reales.

Prueba	Materiales Empleados	Temperatura Cambio de Fase	Duración
Prueba 2: PCM RT21 vs. Aire	Mobiliario de prueba con 6,00 kg de PCM RT21 líquido	18 - 23 °C (pico principal 22 °C)	4 días
Prueba 3: PCM RT21 vs. Agua	Mobiliario de prueba con 6,00 kg de PCM RT21 líquido 25 litros de agua	18 - 23 °C (pico principal 22 °C) 0 - 100 °C	4 días
Prueba 4: PCM RT21 Horizontal vs. PCM RT21 Vertical	Componente horizontal con 3 kg de PCM RT21 líquido Componente vertical con 3 kg de PCM RT21 líquido	18 - 23 °C (pico principal 22 °C)	4 días
Prueba 5.1: PCMR21 vs PCM SP21E Sin ventilación	Componente horizontal con 3 kg de PCM RT21 sólido Componente horizontal con 3 kg de PCM SP21E sólido	18 - 23 °C (pico principal 22 °C) 19 - 23 °C	37 horas
Prueba 5.2: PCM RT21 vs PCM SP21E Con ventilación	Componente horizontal con 3 kg de PCM RT21 líquido Componente horizontal con 3 kg de PCM SP21E líquido	18 - 23 °C (pico principal 22 °C) 19 - 23 °C	37 horas

Figura 30. Resumen de las pruebas realizadas.

Prueba 2: PCM RT21 vs. Aire

Objetivo: Evidenciar los cambios en el comportamiento térmico de un espacio vacío de acuerdo a la introducción de un mobiliario con PCM.

Fecha: 18/06/2016 – 21/06/2016

Duración: 4 días

Condiciones: Colocar el mobiliario de prueba con 6,00 kg de PCM RT21 en estado líquido en la Cp0, mientras que la Cp1 se deja vacía. (Figura 31) Ninguna de las celdas dispone de ventilación natural ni de radiación solar directa al interior. Se registra la temperatura interior de cada celda en un intervalo de 30 minutos y se toman los datos ambientales reales de la base de datos del Servicio Meteorológico de Cataluña.



Figura 31. Esquema de posicionamiento en celdas. Prueba 2: PCM RT21 vs. Aire.

En esta prueba se espera que la Cp0 con PCM presente una temperatura más homogénea con respecto a la Cp1 que se encuentra vacía; estabilizando la temperatura entre su rango de funcionamiento 19 – 23 °C, con valores más elevados con respecto a la Cp1 cuando la temperatura exterior sea la mínima; y más bajos cuando la temperatura exterior alcance su punto más alto: calentando la celda durante la noche y enfriándola durante el día.

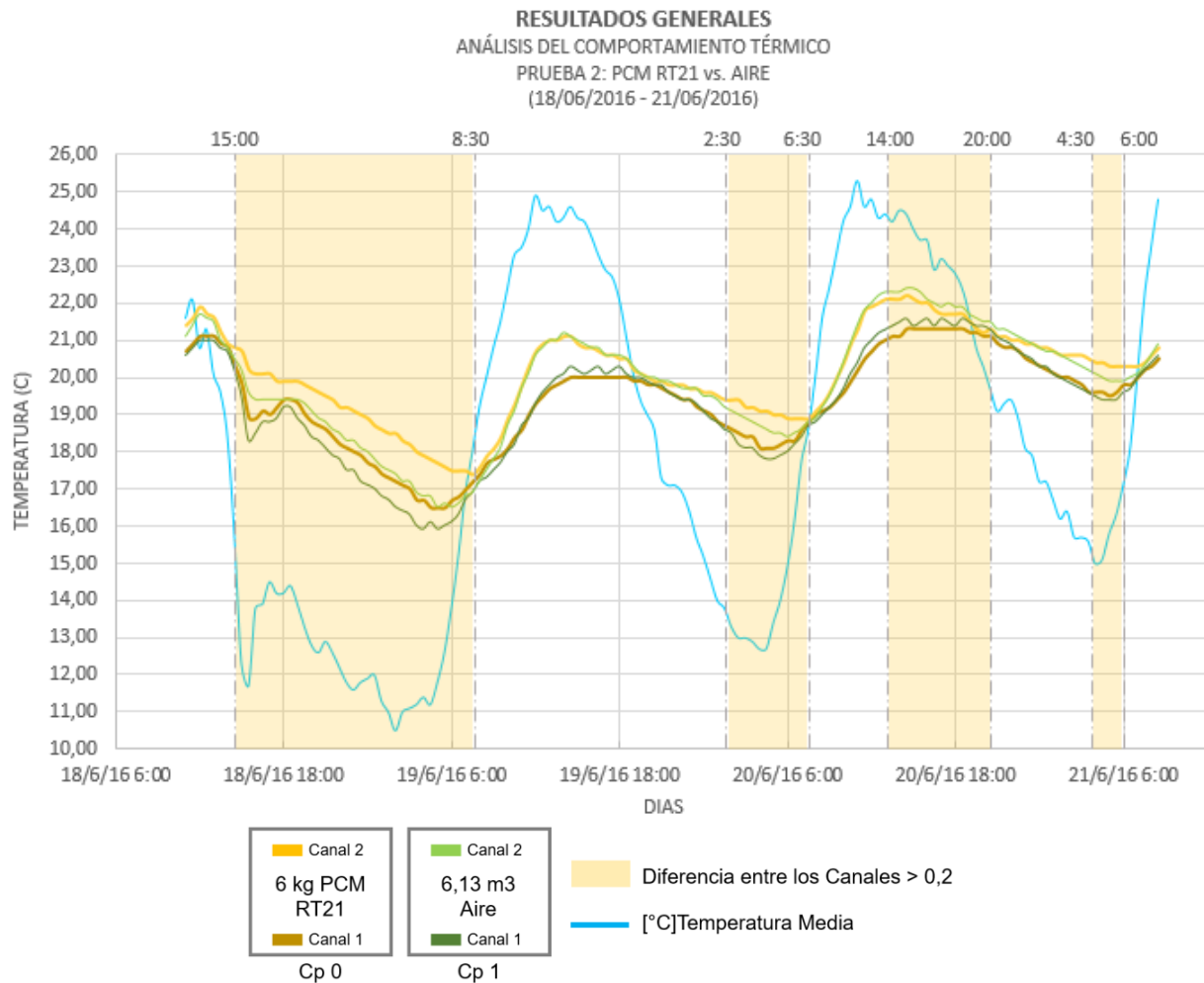


Figura 32. RESULTADOS GENERALES. Análisis del Comportamiento Térmico. Prueba 2: PCM RT21 vs. Aire. (18/06/2016 – 21/06/2016)

Observaciones:

- La mayor diferencia de temperatura ocurre en los periodos de hora pico, tanto diurnos como nocturnos. A medida que la temperatura aumenta o desciende hasta llegar a estos momentos pico, las diferencias entre los canales no superan los 0,2.

Para entender mejor el comportamiento térmico en ambas celdas, se analizan dos días con mayor detalle. El día 20/06/2016, que actúa de acuerdo al comportamiento general observado y el 19/06/2016, como excepción a lo planteado anteriormente, donde las mayores diferencias absolutas se presentan a medida que bajan las temperaturas.

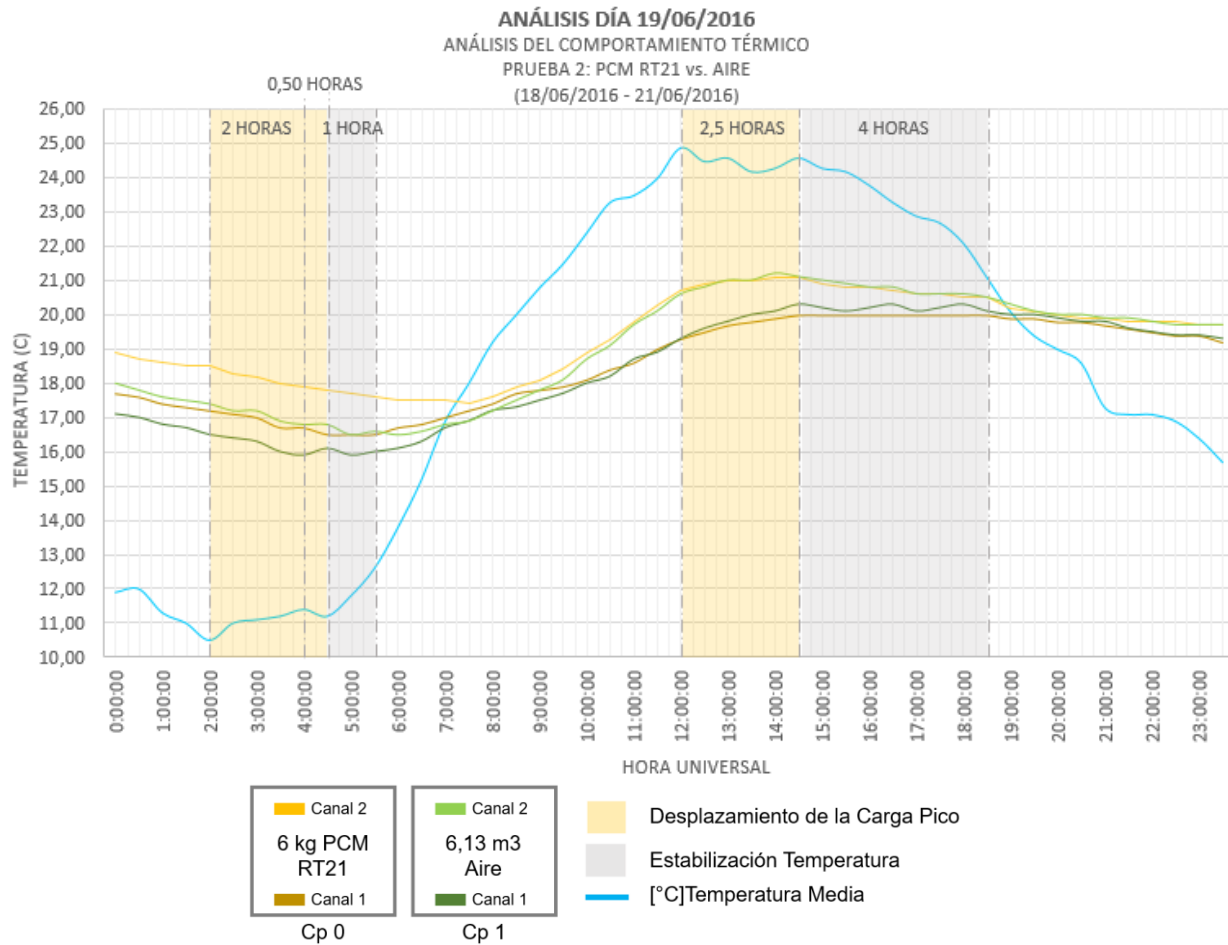


Figura 33. ANÁLISIS DÍA 19/06/2016. Análisis del Comportamiento Térmico. Prueba 2: PCM RT21 vs. Aire. (18/06/2016 – 21/06/2016)

Observaciones:

- La Cp0 presenta un desplazamiento de 3,5 horas de la carga pico nocturna (1,5 horas más que la Cp1). Una vez alcanza su valor mínimo, estabiliza su temperatura por 1 hora, a diferencia de la Cp1, que no logra mantener una temperatura interior constante.
- Al momento que la carga pico nocturna desciende por debajo de los 11°C, la Cp0 mantiene una temperatura mayor con respecto a la Cp1, con una diferencia absoluta de hasta 0,6.
- La Cp0 estabiliza su temperatura a los 16,50°C; 2,5°C por debajo del rango mínimo de funcionamiento del PCM. Una explicación de este comportamiento es el hecho de que, como se observa en la Figura 30, la temperatura empezó a disminuir desde el día anterior y la Cp0 sí se estabiliza a los 19°C, sin embargo, como la temperatura continuó descendiendo a partir de este momento, el PCM ya se había solidificado y era incapaz de absorber más calor.
- Ambas celdas presentan el mismo desplazamiento de 2,5 horas de la carga pico diurna con una diferencia absoluta menor a 0,4. Sin embargo, la Cp0 es capaz de estabilizarse a los 20°C durante 4 horas, mientras la Cp1 presenta fluctuaciones ligeras de temperatura.

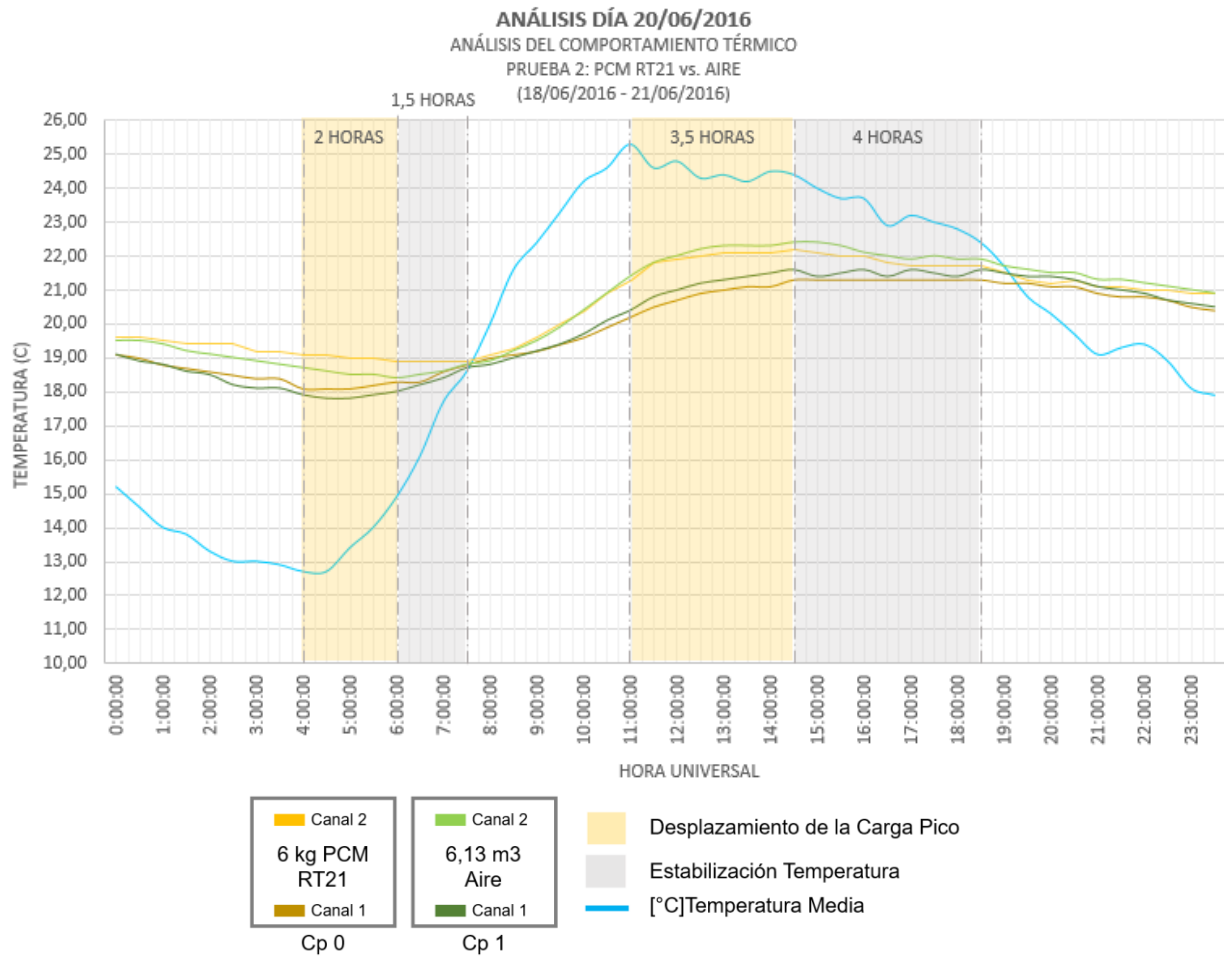


Figura 34. ANÁLISIS DÍA 20/06/2016. Análisis del Comportamiento Térmico. Prueba 2: PCM RT21 vs. Aire. (18/06/2016 – 21/06/2016)

Observaciones:

- Para la carga pico nocturna, las mayores diferencias se observan en los canales 2. Presentando un desplazamiento de 2,5 horas de la carga pico nocturna, donde la Cp0 estabiliza su temperatura en 19,40 °C por 1,5 horas, manteniendo una diferencia absoluta de 0,5 con respecto a la Cp1. El canal 1, las diferencias absolutas no sobrepasan los 0,3.
- En cuanto a la carga pico diurna, las mayores diferencias se observan en los canales 1. Presentando un desplazamiento de 3,5 horas, donde la Cp0 estabiliza su temperatura en 21,30 °C por 4 horas.
- Cuando la temperatura pico dentro de la Cp0 sobrepasa el rango de los 21°C, se logra estabilizar hasta por 4 horas, con una diferencia absoluta de hasta 0,5. A diferencia del día anterior donde la temperatura interior se estabilizó a los 20°C con diferencias de tan solo 0,1 y 0,2. Esto sugiere que, a medida que la temperatura interior se acerca a la temperatura de cambio de fase teórica del material (21 - 23 °C) se estabiliza por más tiempo y mayor será la diferencia entre ambas celdas.

Conclusiones:

- La mayor diferencia de temperatura ocurre en los periodos de hora pico.

- A medida que la temperatura interior se acerca a la ventana térmica del PCM, se estabiliza por más tiempo y aumenta la diferencia entre ambas celdas.
- Si no se alcanza la temperatura adecuada para el cambio de fase, las diferencias absolutas entre las celdas son menores.
- Durante la noche, la temperatura se estabiliza por menos tiempo en relación al día, sin embargo, cuando disminuye dramáticamente, el PCM mantiene una temperatura más elevada y constante en relación al aire.

Prueba 3: PCM RT21 vs. Agua

Objetivo: Comparar el comportamiento térmico de un espacio con PCM con un espacio que contenga agua con la misma capacidad térmica.

El primer paso es calcular la capacidad térmica del mobiliario de prueba con 6 paneles CSM-RT21 (6 kg de PCM) y determinar con cuantos litros de agua se obtiene la misma capacidad térmica. La Tabla 7 muestra que, para obtener una capacidad térmica de 979,95 KJ equivalentes a un mobiliario con 6 kg de PCM RT21, son necesarios 232,71 litros de agua.

CÁLCULO CAPACIDAD TÉRMICA A 25 °C					
cPAUS 1					
MATERIAL	CALOR ESPECÍFICO (Cp) [kJ/kg·K]	DENSIDAD (d) [kg/m³]	MASA (m) [kg]	VOLUMEN (V) [m³]	CAPACIDAD TÉRMICA (Q) [kJ]
PCM RT21	2,00	770,00	6,00	0,0078	12,00
Plancha fibrapan DM 10 mm	1,70	750,00	16,95	0,0226	28,82
Aluminio	0,90	2700,00	2,10	0,00078	1,88
Aire	1,01	1,18	7,20	6,10	7,25
Subtotal:					49,95
Calor Latente PCM RT21 [KJ/kg]					155,00
					930,00
Capacidad Total:					979,95
cPAUS 2					
MATERIAL	CALOR ESPECÍFICO (Cp) [kJ/kg·K]	DENSIDAD (d) [kg/m³]	MASA (m) [kg]	VOLUMEN (V) [m³]	CAPACIDAD TÉRMICA (Q) [kJ]
Aire	1,01	1,18	7,20	6,10	7,25
Agua	4,18	997,13	232,71	0,233	972,71
Capacidad Total:					979,95

Volumen cPAuS [m³]: 6,13

FÓRMULAS:

$$Q = Cp \cdot m \cdot dt \quad Q = Cp \cdot V \cdot densidad \cdot dT \rightarrow V = Q / densidad \cdot Cp$$

donde

Q (kJ) = Capacidad Térmica

Cp (kJ/kg·K) = Calor Específico

m (kg) = Masa

dt (K) = Diferencial de Temperatura

(este valor será igual para todos los casos, por lo que se desprecia)

$$m = d \cdot V$$

donde

d (kg/m³) = Densidad

V (m³) = Volumen

Tabla 7. Cálculo capacidad térmica celdas PAuS. [48] [49] [52] [53] [54] [55]

Fecha: 14/06/2016 – 17/06/2016

Duración: 4 días

Condiciones: Colocar el mobiliario con 6 kg de PCM RT21 en estado líquido en la Cp0 y en la Cp1 iniciar con 25 litros de agua, envasados en botellas de 2 litros para obtener mayor coeficiente de forma. (Figura 35) Ninguna de las celdas dispone de ventilación natural ni de radiación solar directa al interior. Se registra la temperatura interior de cada celda en un intervalo de 30 minutos y se toman los datos ambientales reales de la base de datos del Servicio Meteorológico de Cataluña.



Figura 35. Esquema de posicionamiento en celdas. Prueba 3: PCM RT21 vs. Agua

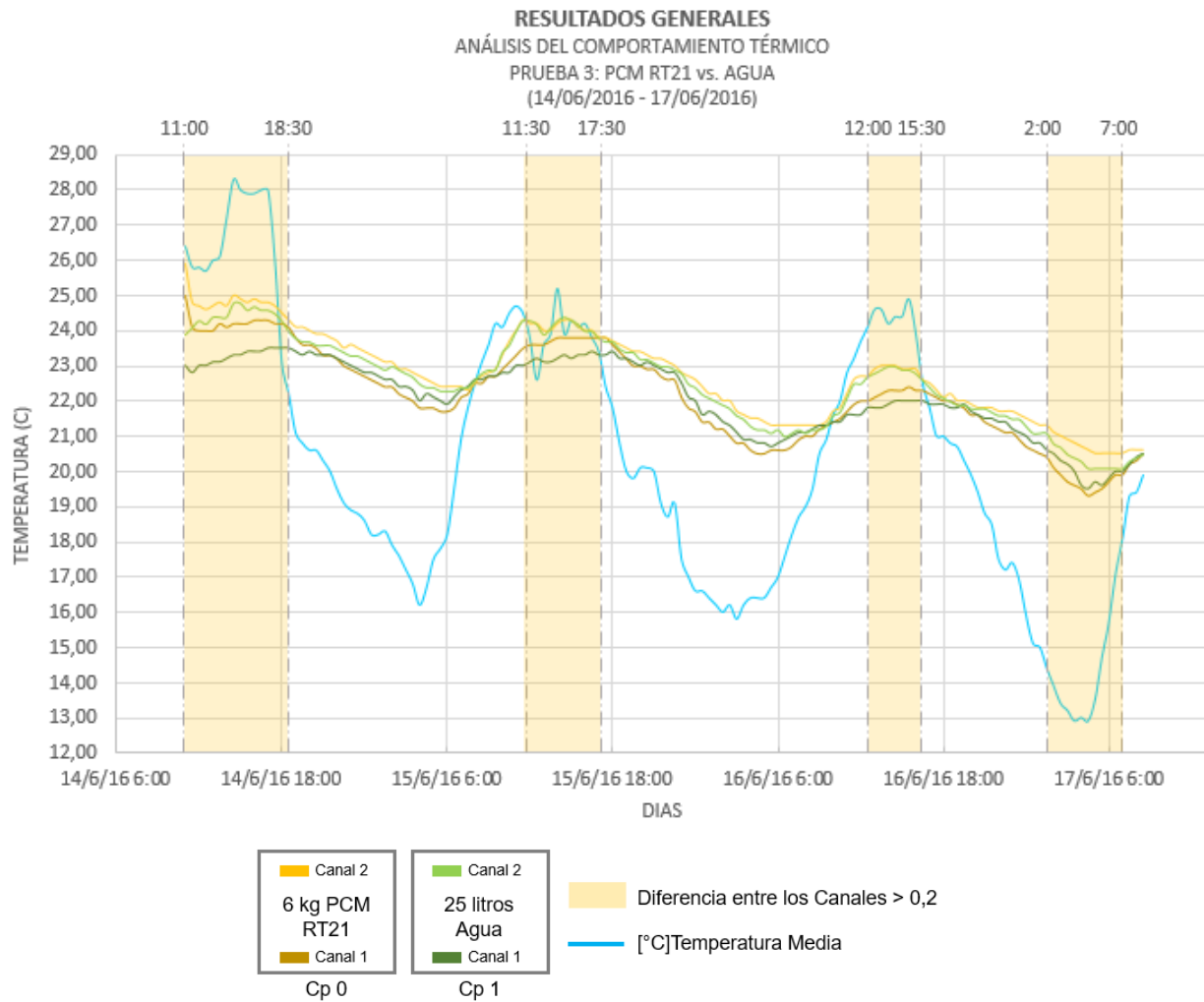


Figura 36. RESULTADOS GENERALES. Análisis del Comportamiento Térmico. Prueba 3: PCM RT21 vs. Agua (14/06/2016 – 17/06/2016)

Observaciones:

- A excepción de la prueba anterior, solo se presencian diferencias absolutas mayores a 0,4 durante la carga pico diaria. Durante la noche, solo ocurre cuando la temperatura exterior desciende por debajo de los 13°C.

Para entender mejor el comportamiento térmico en ambas celdas, se analizan dos días con mayor detalle. El día 15/06/2016, donde la temperatura de la Cp0 se estabiliza por más tiempo, y el 16/06/2016 cuando la temperatura exterior baja drásticamente en relación a los demás días.

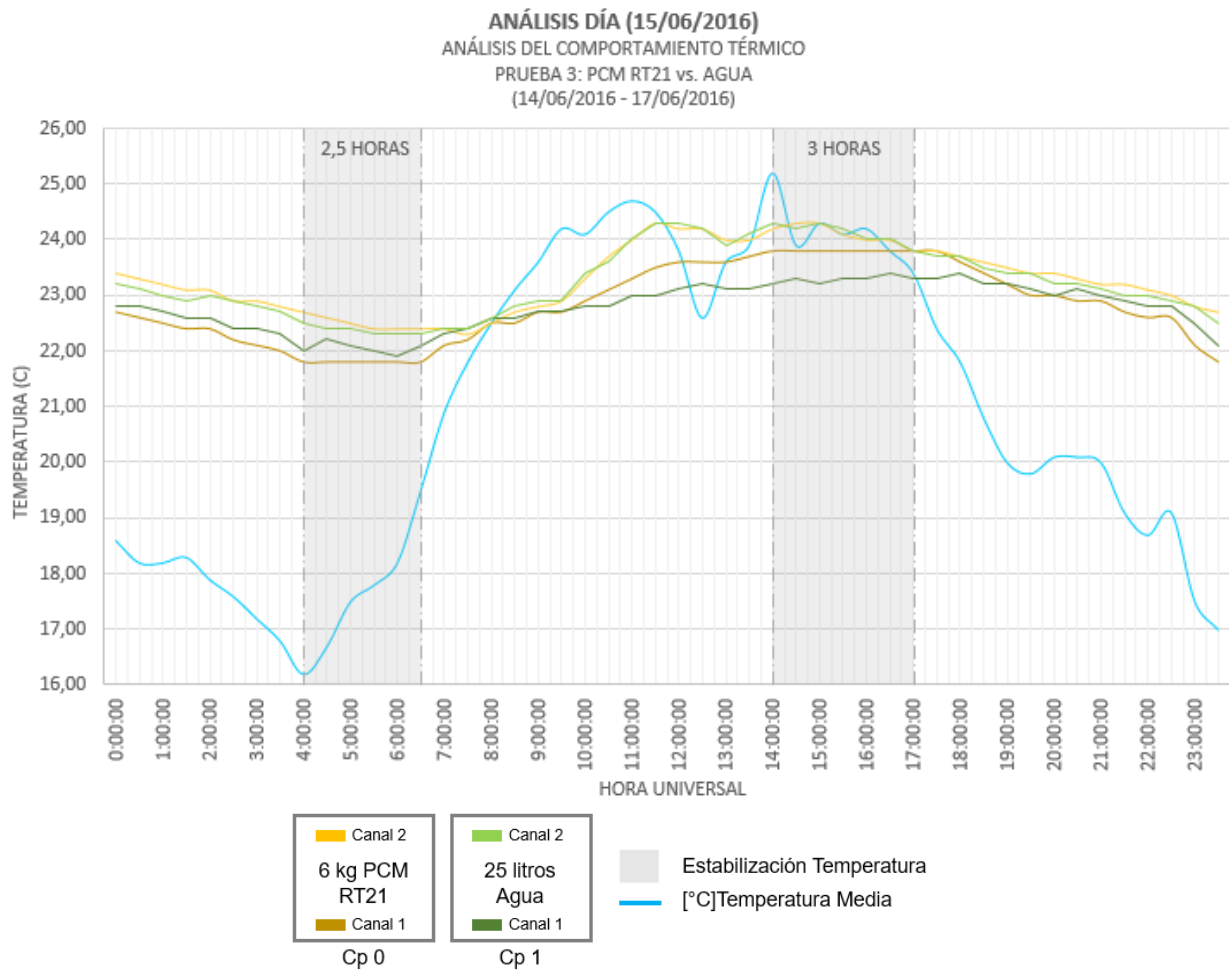


Figura 37. ANÁLISIS DÍA 15/06/2016. Análisis del Comportamiento Térmico. Prueba 3: PCM RT21 vs. Agua (14/06/2016 – 17/06/2016)

Observaciones

- La Cp1, a pesar de que no logra estabilizar su temperatura interior, presenta menos saltos térmicos que la Cp0.
- Durante la noche, la Cp0 muestra un cambio de fase, estabilizando por 2,5 horas su temperatura a los 21,80°C. Ya que la temperatura exterior no descendió más, al aumentar durante el día, la Cp0 se estabiliza a 23,80°C, por encima de su ventana térmica y con una diferencia de hasta 0,6 con respecto a la Cp1.

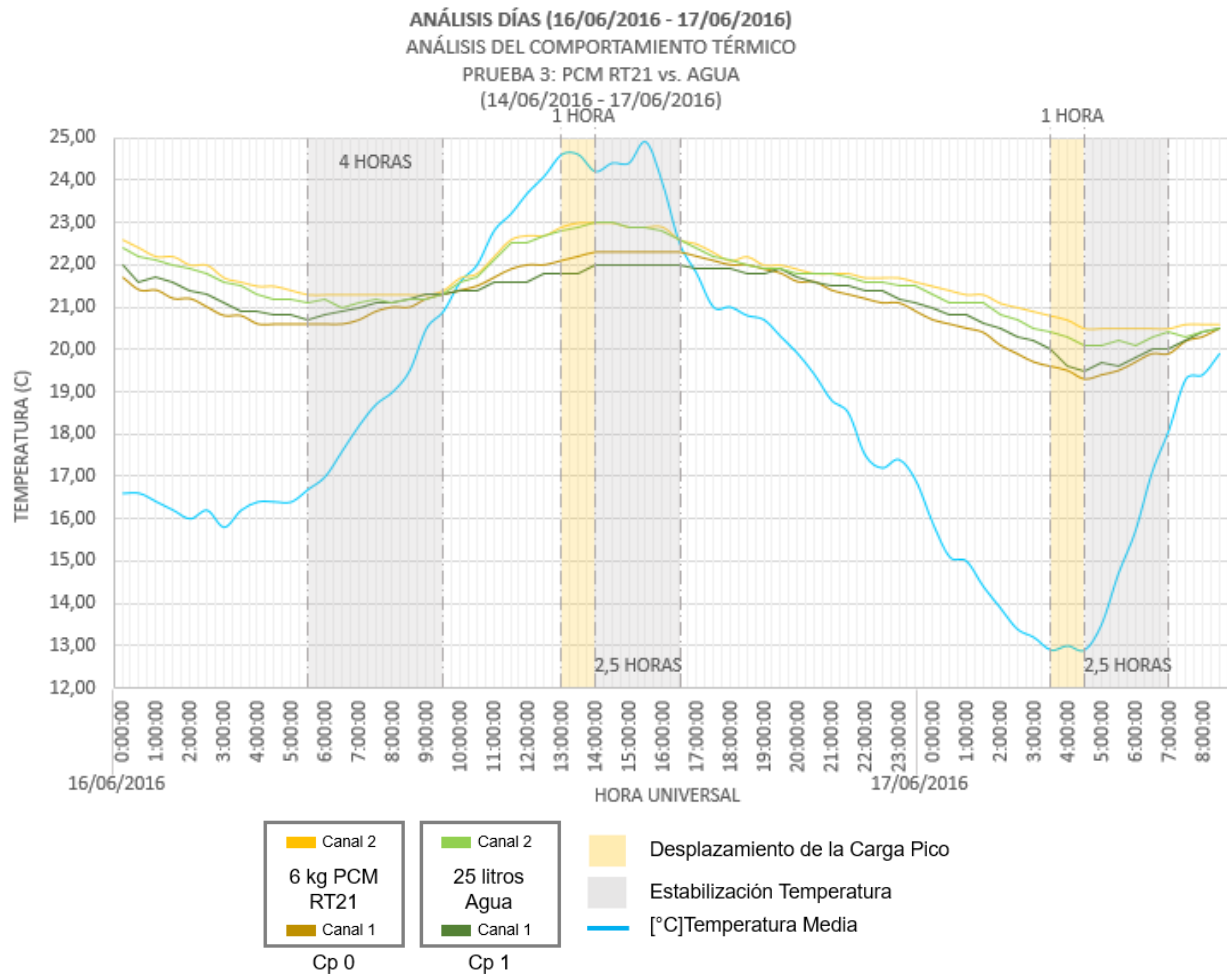


Figura 38. ANÁLISIS DÍAS 16/06/2016 – 17/06/2016. Análisis del Comportamiento Térmico. Prueba 3: PCM RT21 vs. Agua (14/06/2016 – 17/06/2016)

Observaciones:

- A medida que la temperatura baja, la diferencia entre los canales 1 y 2 al interior de la Cp1 disminuye, mientras que la diferencia en la Cp0 aumenta, manteniendo una temperatura más cálida y estable en la parte superior de la celda durante 4 horas, mientras que en la Cp1 siempre se presentan fluctuaciones.
- La carga pico diurna no sobrepasó los 25°C, con lo cual, la Cp0 presenta su cambio de fase a los 22°C. Al momento que disminuye la temperatura por debajo de los 13°C, no se aprecia ninguna estabilización de la temperatura en el canal 1, lo que significa que la temperatura máxima no fue suficiente para fusionar todo el material, quedándose parcialmente cristalizado.

Conclusiones:

- A pesar de que el agua no logra estabilizar la temperatura al igual que el PCM, se ve menos afectada por las fluctuaciones de temperatura; manteniendo temperaturas más cálidas durante la noche y más frescas durante el día.
- Con la introducción de los 232,71 litros de agua con una capacidad térmica equivalente al mobiliario con 6 kg de PCM RT21, se estima que, exhibiría un comportamiento similar frente a las fluctuaciones de temperatura, sin embargo,

lograría estabilizar la temperatura interior por periodos más largos de tiempo, ya que con tan solo 25 litros, no se logró.

Prueba 4: PCM RT21 Horizontal vs. PCM RT21 Vertical

Objetivo: Determinar la ubicación más favorable dentro del mobiliario para el óptimo funcionamiento de los PCM.

Fecha: 23/06/2016 – 26/06/2016

Duración: 4 días

Condiciones: Colocar un componente horizontal con 3 kg de PCM RT21 en estado líquido en la Cp0, mientras que en la Cp1, se colocan los mismos paneles, pero utilizando un componente vertical. (Figura 39) Ninguna de las celdas dispone de ventilación natural ni de radiación solar directa al interior. Se registra la temperatura interior de cada celda en un intervalo de 30 minutos y se toman los datos ambientales reales de la base de datos del Servicio Meteorológico de Cataluña.



Figura 39. Esquema de posicionamiento en celdas. Prueba 4: PCM RT21 Horizontal vs. PCM RT21 Vertical

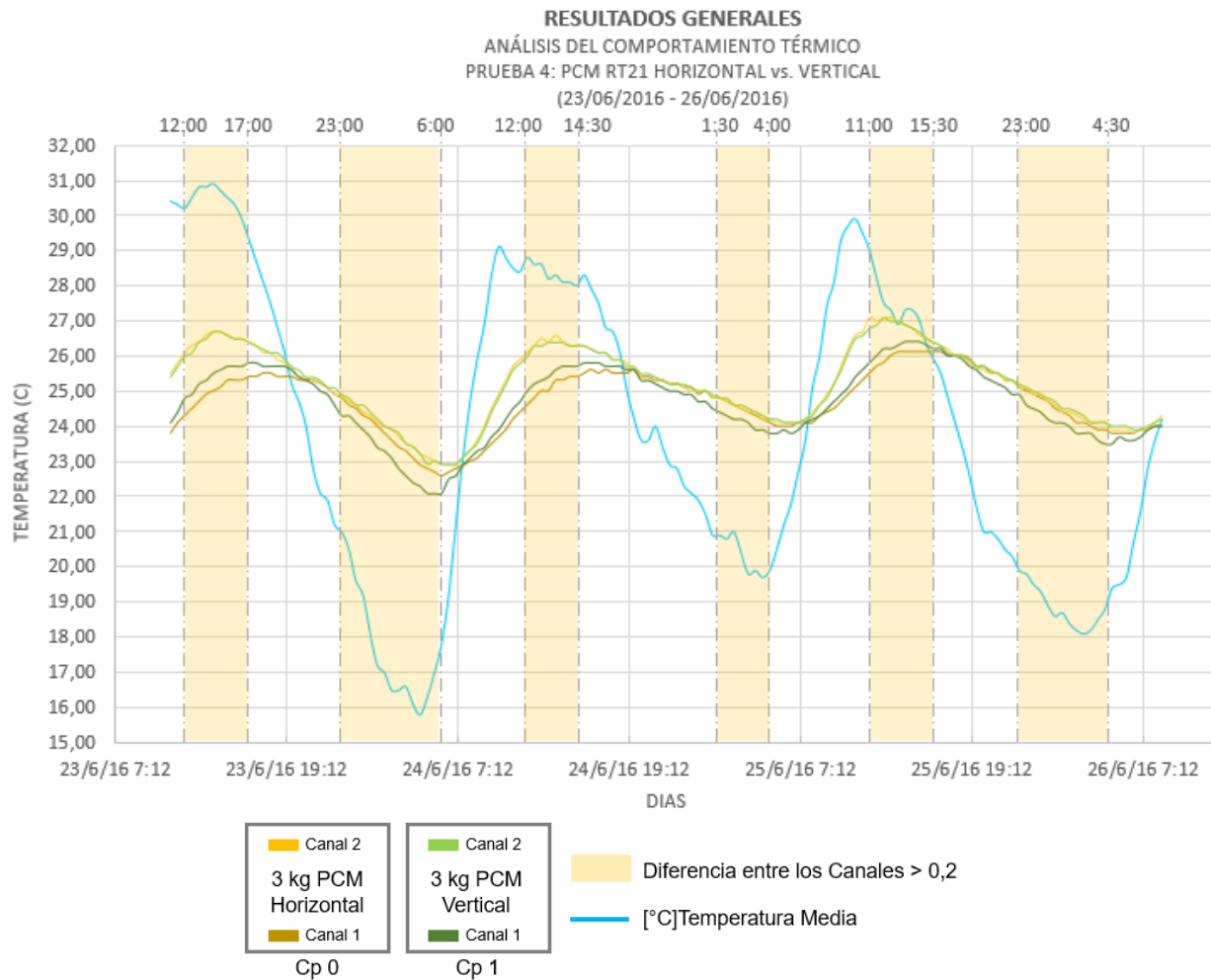


Figura 40. RESULTADOS GENERALES. Análisis del Comportamiento Térmico. Prueba 4: PCM RT21 Horizontal vs. Vertical. (23/06/2016 – 26/06/2016)

Al igual que en los casos anteriores, la mayor diferencia de temperatura ocurre en los periodos pico del día, especialmente donde las temperaturas son las más extremas. Para entender mejor el comportamiento térmico en ambas celdas, se analizan dos días con mayor detalle. Los días 24/06/2016 y 25/06/2016, donde las diferencias absolutas son mayores, presentan el mayor desplazamiento de la carga pico y las temperaturas se estabilizan por más tiempo.

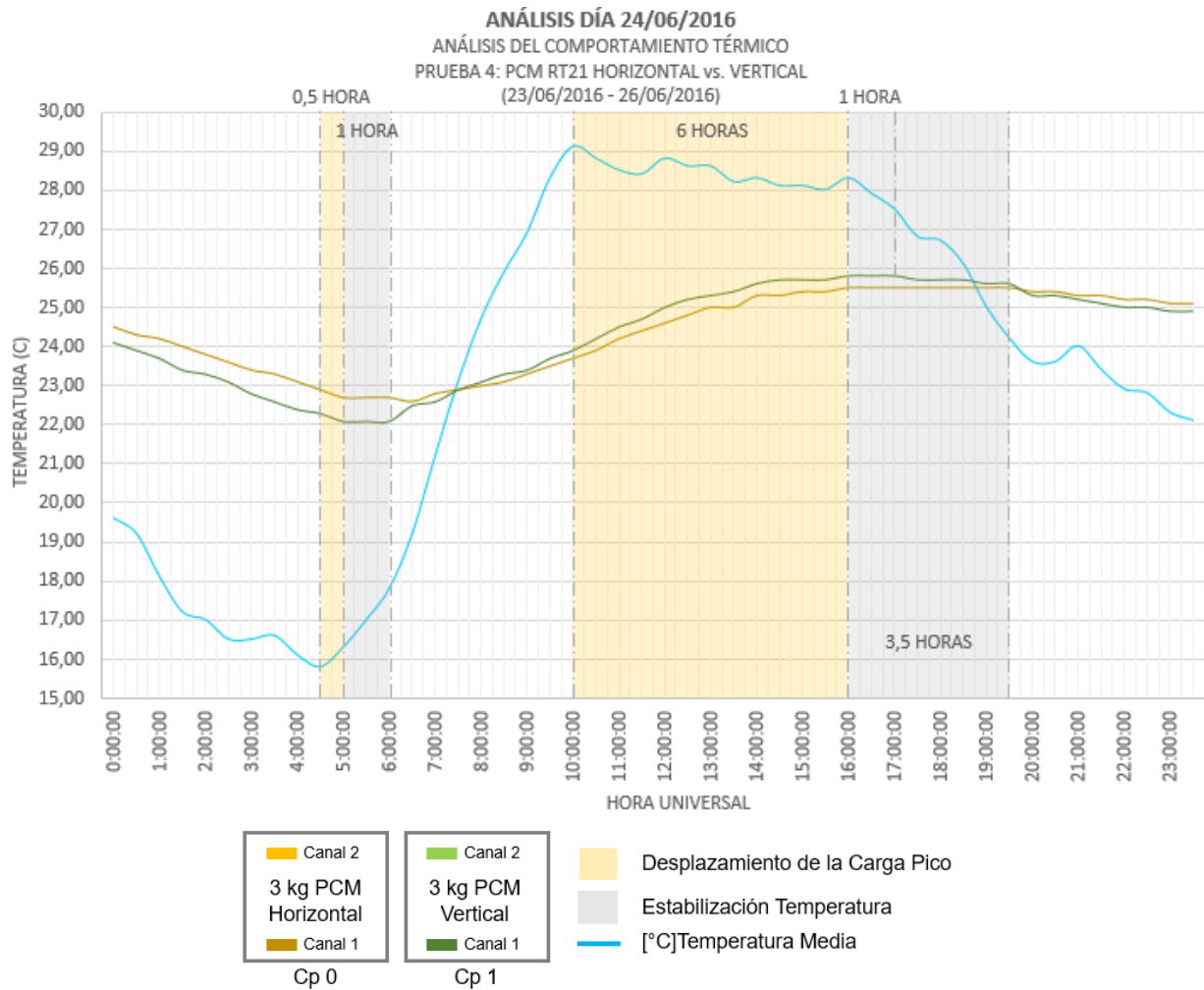


Figura 41. ANÁLISIS DÍA 24/06/2016. Análisis del Comportamiento Térmico. Prueba 4: PCM RT21 Horizontal vs. Vertical. (23/06/2016 – 26/06/2016)

Observaciones:

- Ambas celdas presentan el mismo desplazamiento de la carga pico.
- En la noche, la Cp0 mantiene una temperatura más cálida con diferencias absolutas dentro de los 0,4; mientras que en el día mantiene una temperatura más fresca que la Cp1.
- La temperatura mínima exterior alcanzó los 15,80°C; con lo cual, la temperatura al interior de las celdas se estabilizó en el rango de los 22,00°C. Sin embargo, solo presentan un desplazamiento de la carga pico de 30 minutos. Esto sugiere que no se realizó ningún cambio de fase y esta estabilización es producto de la inercia térmica del mobiliario. Al momento de alcanzar la carga pico diurna, la Cp0 logra estabilizar su temperatura hasta por 3,5 horas, evidenciando un cambio de fase; al contrario de la Cp1 que no presenta ningún cambio en su comportamiento.

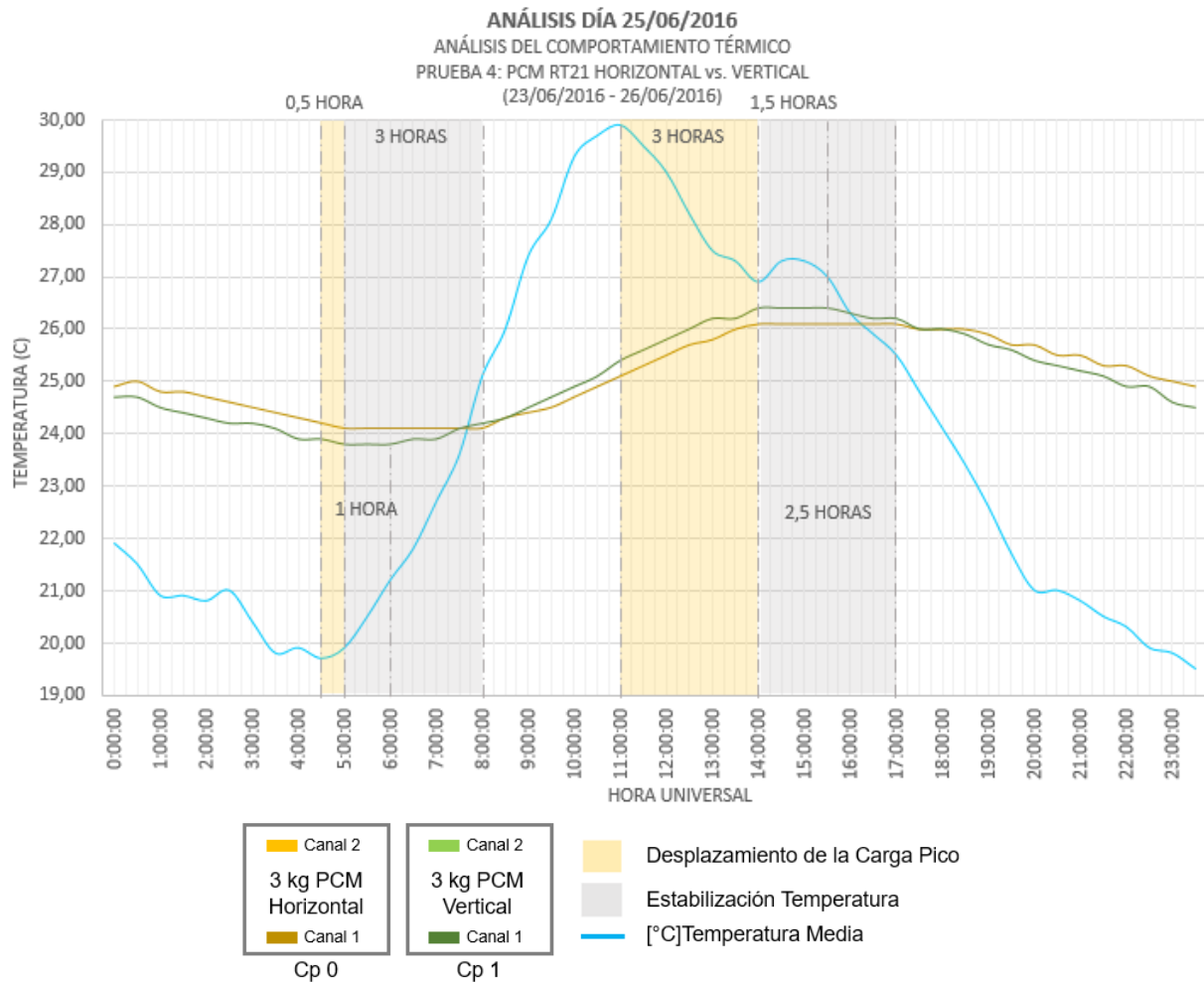


Figura 42. ANÁLISIS DÍA 25/06/2016. Análisis del Comportamiento Térmico. Prueba 4: PCM RT21 Horizontal vs. Vertical. (23/06/2016 – 26/06/2016)

Observaciones:

- La temperatura mínima alcanzó a penas los 19,70°C, causando que las temperaturas interiores de las celdas se estabilizaran por encima de los 23°C.
- Ambas celdas presentan el mismo desplazamiento de la carga pico. Sin embargo, nuevamente la Cp0 logra estabilizar su temperatura hasta por 2,5 horas más que la Cp1; manteniendo temperaturas más cálidas durante la noche y más frescas durante el día.

Conclusiones:

- El componente de mobiliario en horizontal presenta un comportamiento más óptimo en relación a su disposición en vertical.
- Ambas celdas contaban con la misma cantidad y el mismo tipo de material, con lo cual presentan la misma capacidad térmica, produciendo los mismos desplazamientos de la hora pico. Sin embargo, la posición horizontal demostró estabilizar la temperatura interior por un periodo de 1,5 a 2,5 horas más que su posición vertical.
- Al bajar la temperatura exterior, mantuvo niveles térmicos más elevados al interior de la celda en relación a la Cp1 y, del mismo modo, al subir la temperatura exterior, mantuvo un ambiente más fresco, con temperaturas más bajas, en comparación con la otra celda.

Prueba 5: PCM RT21 vs PCM SP21E

Objetivo: Determinar qué tipo de PCM presenta un mejor funcionamiento: el PCM RT21 (material orgánico con un solo punto de cambio de fase) o el PCM SP21E (material inorgánico con los puntos de fusión y solidificación diferentes) y cómo afecta el estado del PCM y la ventilación en el comportamiento térmico.

A raíz de los resultados de las pruebas anteriores donde la temperatura al interior de la celda supera el intervalo de cambio de fase del material, se decidió incluir dos variables más: el estado inicial del material (si al inicio de la prueba se encuentra en estado sólido o líquido) y la ventilación. De este modo, se llevaron a cabo dos pruebas para determinar las condiciones óptimas para la mejor efectividad del material.

- Sin ventilación

Fecha: 28/06/2016 - 30/06/2016

Duración: 37 horas

Condiciones: Colocar 6 kg de PCM RT21 solidificado en posición horizontal en la Cp0, mientras que en la Cp1 se colocan 6 kg de SP21E solidificado en posición horizontal (Figura 43) Ninguna de las celdas dispone de ventilación natural ni de radiación solar directa al interior. Se registra la temperatura interior de cada celda en un intervalo de 30 minutos y se toman los datos ambientales reales de la base de datos del Servicio Meteorológico de Cataluña.



Figura 43. Esquema de posicionamiento en celdas. Prueba 5.1: PCM RT21 vs. PCM SP21E – sin ventilación.

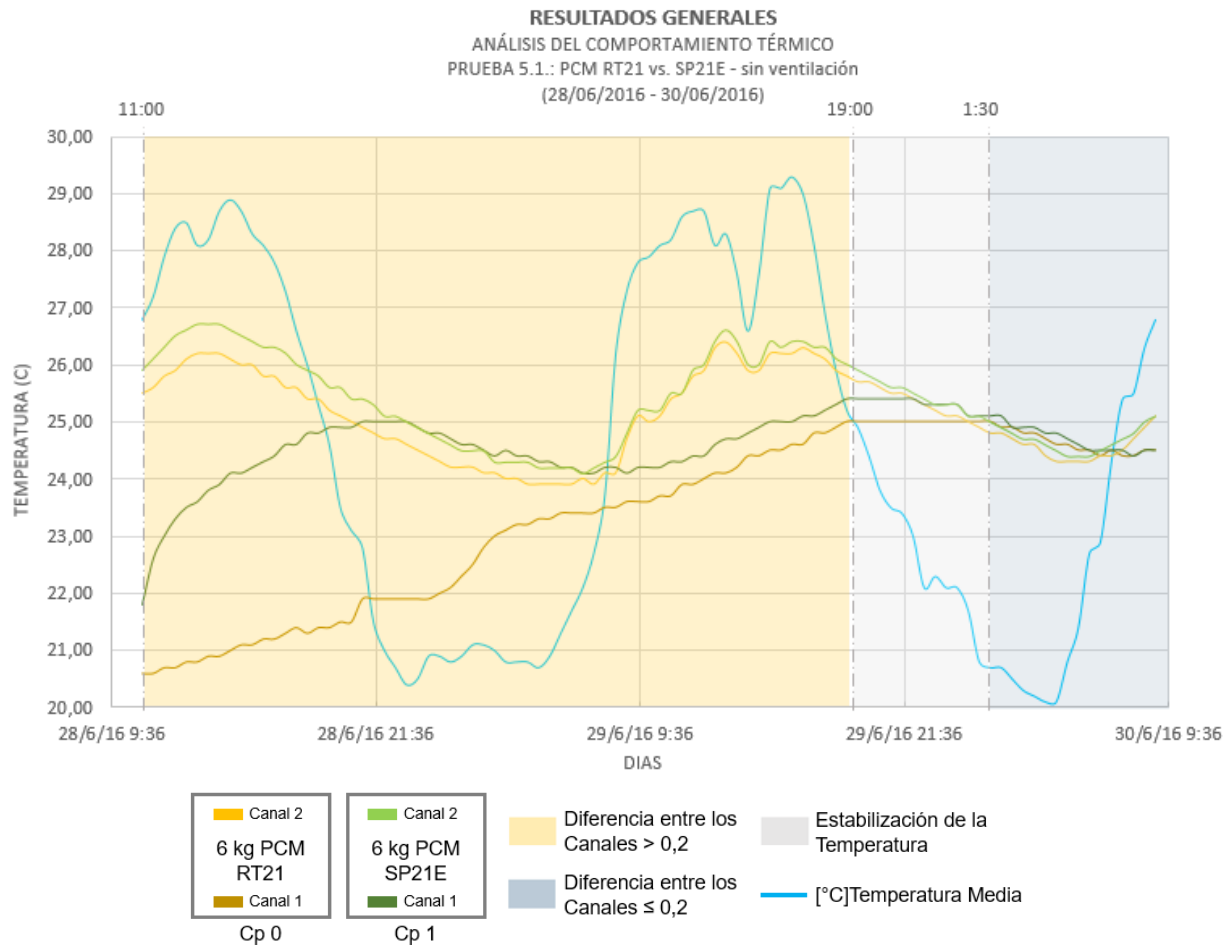


Figura 44. RESULTADOS GENERALES. Análisis Del Comportamiento Térmico. PRUEBA 5.1.: PCM RT21 vs. SP21E - sin ventilación. (28/06/2016 - 30/06/2016)

Observaciones:

- Desde el inicio de la prueba, ambas celdas van aumentando su temperatura paulatinamente hasta alcanzar su valor máximo, 32 horas después.
- A medida que aumentan las temperaturas, se mantiene una diferencia absoluta de hasta 3,5 entre ambas celdas. Una vez alcanzan su carga pico a las 19h del siguiente día, ambas estabilizan su temperatura manteniendo una diferencia de 0,4. Sin embargo, una vez empieza a disminuir, las diferencias entre las celdas es casi nula.

Para entender mejor el comportamiento térmico en ambas celdas, se analizan los días 28/06/2016 y 29/06/2016 con más detalle.

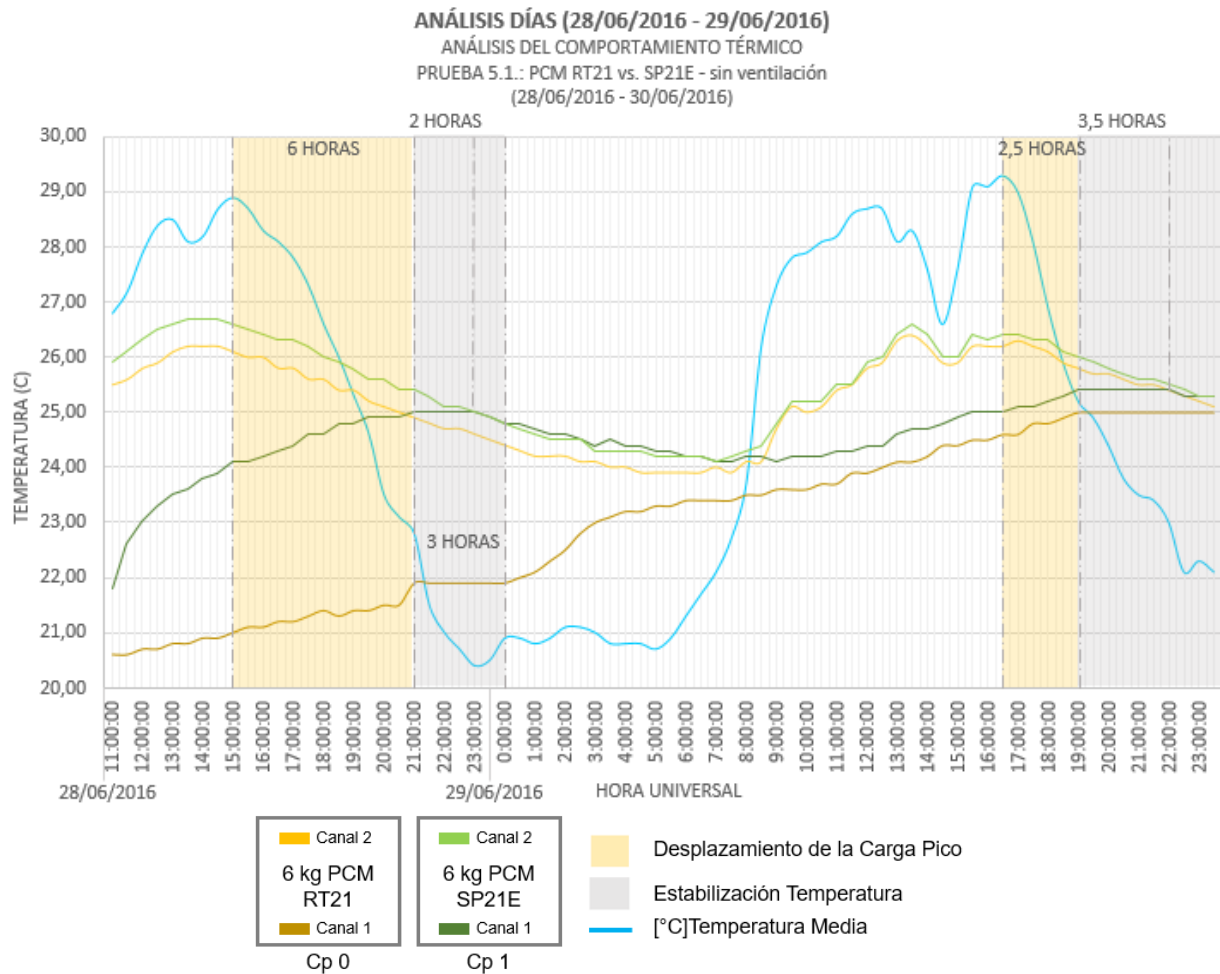


Figura 45. ANÁLISIS DÍAS 28/06/2016 – 29/06/2016. Análisis Del Comportamiento Térmico. PRUEBA 5.1.: PCM RT21 vs. SP21E - sin ventilación. (28/06/2016 - 30/06/2016)

Observaciones:

- Ambos paneles se encontraban solidificados, sin embargo, la temperatura inicial de la Cp0 es de 20,60 °C, mientras que en la Cp1 es de 21,80 °C.
- A medida que va absorbiendo calor para el cambio de fase, la Cp0 se calienta más lentamente, tardando un total de 10 horas en producir un cambio de temperatura de 1,30°C, hasta alcanzar los 21,90 °C, a partir de este momento la temperatura se estabiliza por 3 horas hasta llegar a los 22°C. Aquí, se marca un cambio de tendencia donde el calentamiento es mucho más rápido, aumentando nuevamente 1,30 °C en tan solo 4,5 horas.
- Una vez iniciada la prueba, la Cp1 aumenta su temperatura mucho más rápido que la Cp0, produciendo una diferencia de 3,5°C en las 10 horas que la Cp0 mostró un cambio de tan solo 1,30°C.
- Cuando se presenta la hora pico al siguiente día, ambas celdas presentan el mismo desplazamiento de 2,5 horas, ambas temperaturas se mantienen constantes, solo que en la Cp1 se estabiliza por 3,5 horas y la Cp0 por 7 horas hasta la 1:30:00 del siguiente día.

Conclusiones:

- El PCM RT21, con un solo punto de cambio de fase, presenta un comportamiento térmico más eficaz que el PCM SP21E con dos rangos de temperatura de cambio de fase, demostrando mayor estabilidad dentro del rango de temperatura deseado.
- El estado inicial del PCM representa un factor determinante a la hora de optimizar su comportamiento térmico, demostrando que puede lograr mantener una temperatura entre los 21 – 23 °C en periodos de hasta 16,5 horas y estabilizar la temperatura hasta por 7 horas.
- Una vez el PCM absorbe el calor y se encuentra totalmente líquido, si no cuenta con un sistema de renovación del aire, es incapaz de solidificarse y continuar el ciclo.

- Con ventilación

Semana 1.

Fecha: 30/06/2016 - 02/07/2016

Duración: 37 horas

Condiciones: Colocar 6 kg de PCM RT21 líquido en posición horizontal en la Cp0, mientras que en la Cp1 se colocan 6 kg de SP21E líquido en posición horizontal. Ambas celdas disponen de ventilación natural. (Figura 46) Se registra la temperatura interior de cada celda en un intervalo de 30 minutos y se toman los datos ambientales reales de la base de datos del Servicio Meteorológico de Cataluña.



Figura 46. Hueco superior para ventilación natural dentro de las celdas.

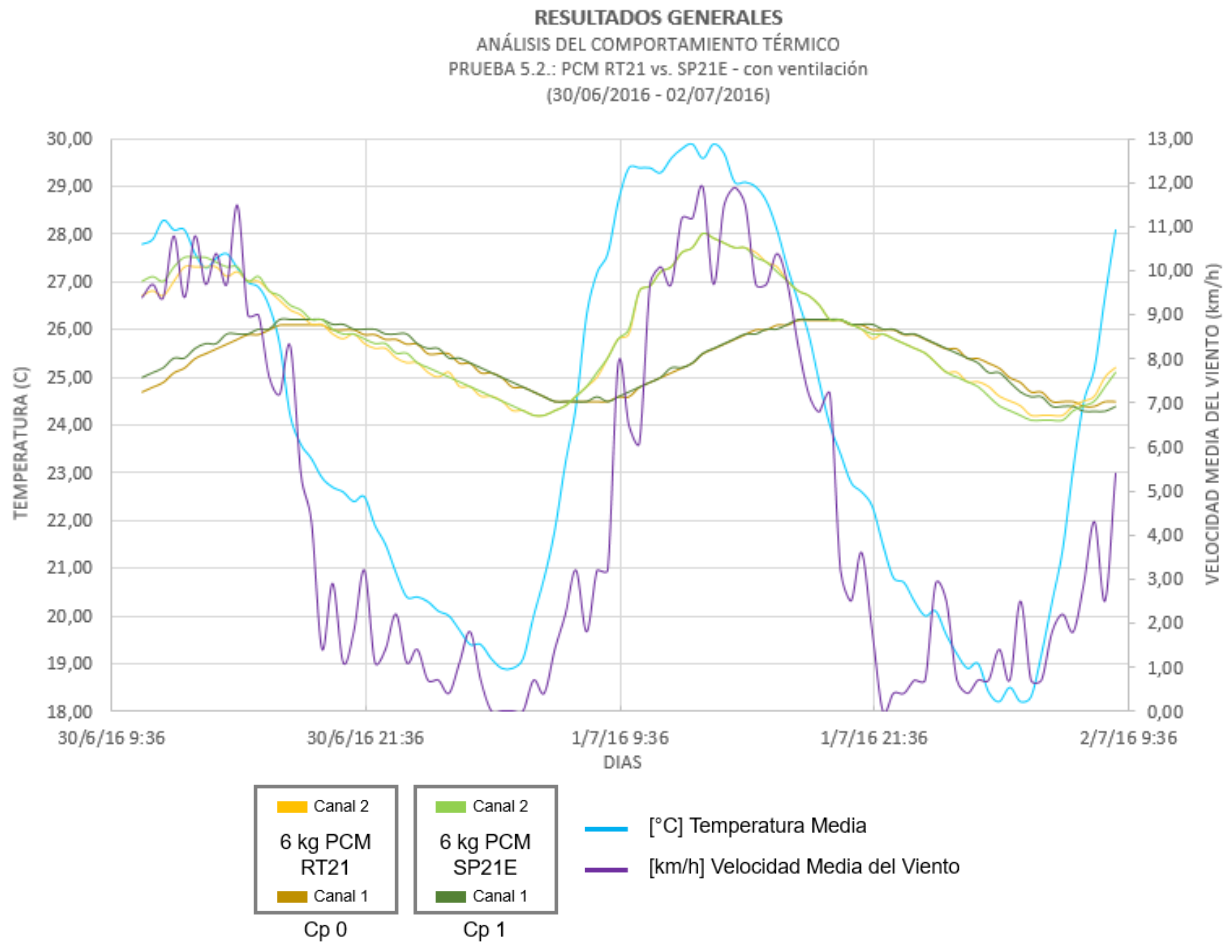


Figura 47. RESULTADOS GENERALES. Análisis Del Comportamiento Térmico. PRUEBA 5.2.: PCM RT21 vs. SP21E - con ventilación. Semana 1 (30/06/2016 - 02/07/2016)

Observaciones:

- A pesar de que la temperatura exterior descendió hasta los 18°C, la velocidad del viento no superó los 12 km/h. Estas condiciones ocasionaron que la temperatura al interior de las celdas se mantuviera por encima de los 24 °C, fuera de la ventana térmica de cambio de fase. Razón por la cual las diferencias absolutas entre los canales de las celdas no superan los 0,2.
- Los canales superiores de ambas celdas responden inmediatamente a las fluctuaciones exteriores. Sin embargo, los canales inferiores, más cerca del mobiliario, presentan una temperatura más homogénea, manteniendo un comportamiento similar a los casos anteriores, donde se llega a una temperatura pico, se estabiliza por un periodo determinado y luego cambia nuevamente. Manteniendo temperaturas más frescas durante el día y más cálidas en la noche.

Semana 2.

Fecha: 11/07/2016 - 16/07/2016

Duración: 6 días

Dado a que los resultados anteriores no fueron los esperados, se decide realizar nuevamente esta prueba en un periodo más prolongado de 6 días, manteniendo las mismas condiciones.

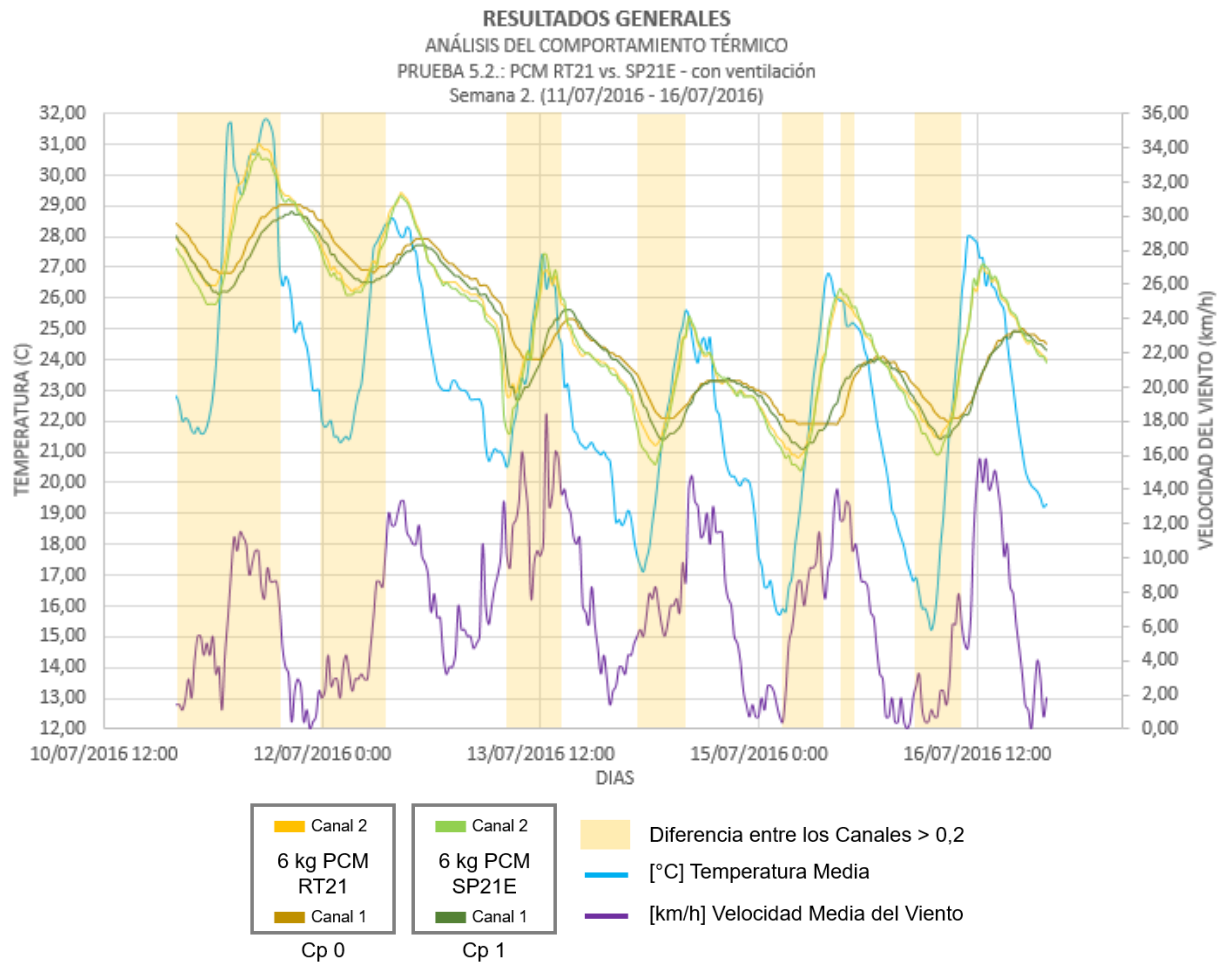


Figura 48. RESULTADOS GENERALES. Análisis Del Comportamiento Térmico. PRUEBA 5.2.: PCM RT21 vs. SP21E - con ventilación. Semana 2 (11/07/2016 - 16/07/2016)

Observaciones:

- A medida que la temperatura exterior se mantiene por encima de los 20°C, la temperatura al interior de la celda se mantiene por encima de los 25°C, fuera de la ventana térmica de funcionamiento de los PCM. Una vez disminuye por debajo de los 18°C, se presencia un cambio al interior de las celdas, donde la temperatura se mantiene entre los 23 y 20°C y se estabiliza por periodos más largos de tiempo.
- La velocidad del viento alcanza hasta los 18 km/h, presentando valores mucho más elevados que la prueba anterior, donde no supera los 12 km/h.
- Las mayores diferencias absolutas, de hasta 1,8; se presentan en las horas de la noche cuando la temperatura interior disminuye. Estas diferencias también se presentan el día 11/07/2016 cuando la temperatura exterior alcanza su valor máximo, superando los 31°C.

Para entender mejor el comportamiento térmico en ambas celdas, se analizan dos días con mayor detalle: el día 13/07/2016, cuando la temperatura ambiente disminuye por debajo de los 21°C y la velocidad del viento alcanza su valor máximo; y 15/07/2016, cuando se presenta el mayor tiempo de estabilización de la temperatura interior.

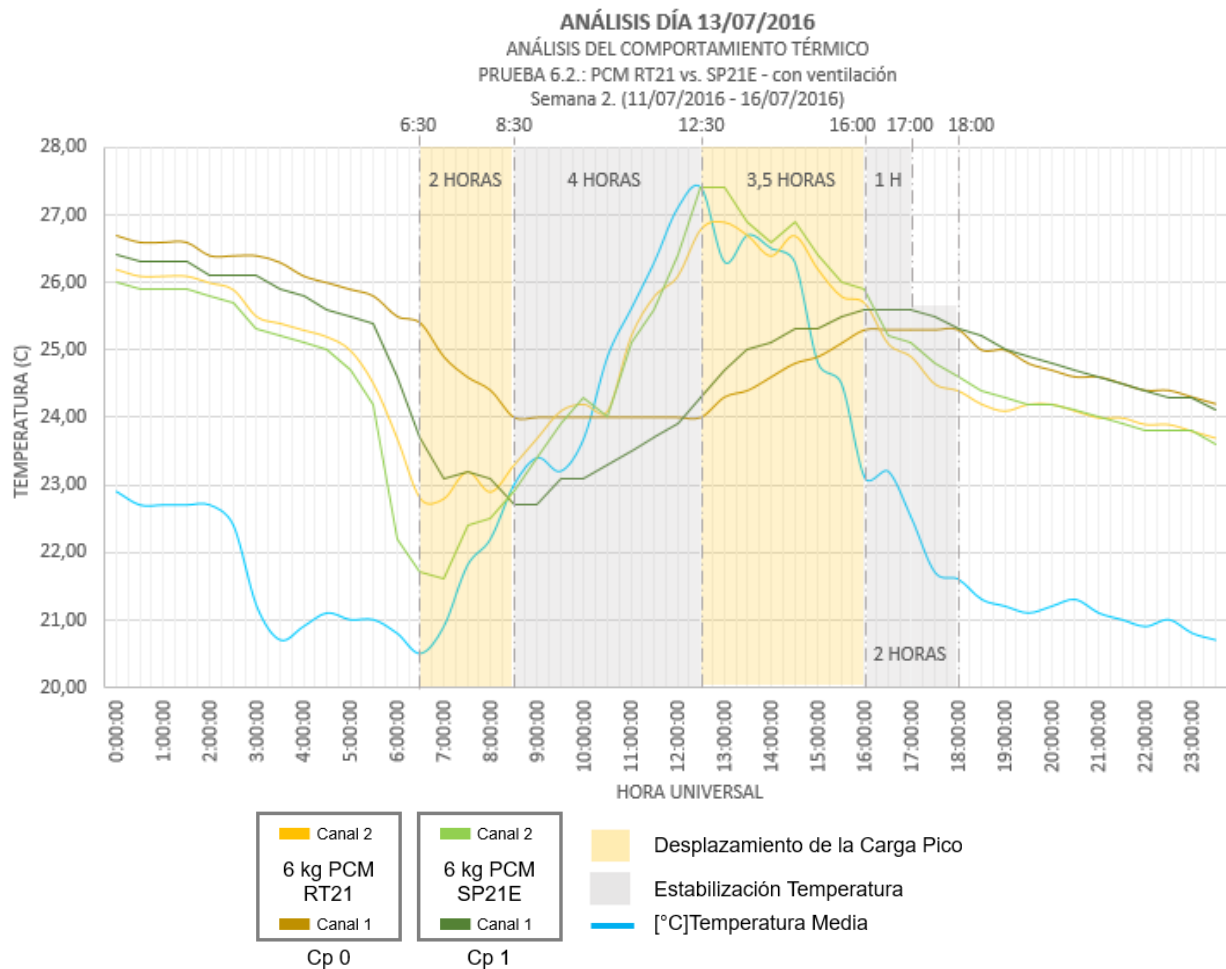


Figura 49. ANÁLISIS DÍA 13/07/2016. Análisis Del Comportamiento Térmico. PRUEBA 5.2.: PCM RT21 vs. SP21E - con ventilación. Semana 2 (11/07/2016 - 16/07/2016)

Observaciones:

- Debido a que el hueco de ventilación se encuentra en la parte superior, los canales 2 de ambas celdas responden inmediatamente a las fluctuaciones exteriores. Sin embargo, el de la Cp0 mantiene temperaturas mucho más cálidas durante la noche, con una diferencia de hasta 1,2 con respecto a la Cp1.
- Tal como en pruebas anteriores, dado que la temperatura exterior no disminuyó por debajo de la ventana térmica del PCM, la Cp0 estabiliza su temperatura a los 24°C hasta por 4 horas, fuera de su ventana de funcionamiento.
- Al subir aún más las temperaturas durante el día, el material ya se encontraba saturado, por lo que fue incapaz de absorber más calor y, como consecuencia, la Cp0 se estabilizó a una temperatura aún mayor (25°C) por 2 horas, la mitad de tiempo que durante la noche.

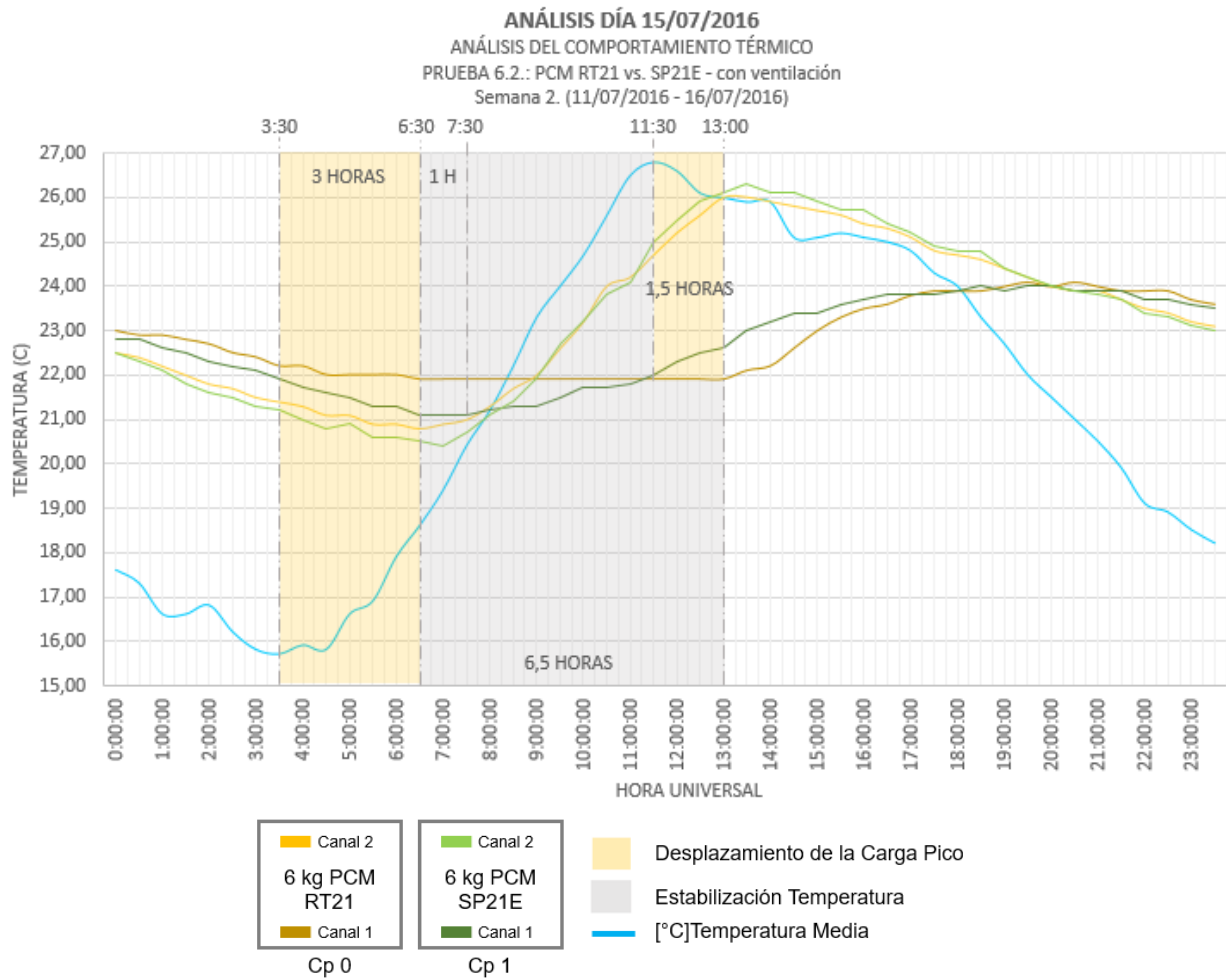


Figura 50. ANÁLISIS DÍA 15/07/2016. Análisis Del Comportamiento Térmico. PRUEBA 5.2.: PCM RT21 vs. SP21E - con ventilación. Semana 2 (11/07/2016 - 16/07/2016)

Observaciones:

- Una vez la temperatura exterior disminuye por debajo de los 16°C, la Cp0 estabiliza su temperatura interior a los 21,90°C dentro de su ventana térmica de funcionamiento por un total de 6,5 horas, desplazándose incluso 1,5 horas después de que la temperatura ambiente alcanza su valor máximo a las 11:30.
- La Cp1 presenta un comportamiento menos eficiente, estabilizando su temperatura a los 21°C, por tan solo 1 hora antes de empezar a aumentar. Esto sugiere que no existe ningún efecto del PCM dentro de la Celda 1.

Conclusiones

- A medida que aumenta la velocidad del viento y disminuye la temperatura durante la noche, es posible renovar el aire interior y solidificar el PCM en su ventana térmica, logrando la estabilización de la temperatura interior en periodos de hasta 6,5 horas.
- El PCM RT21 presenta un comportamiento más eficiente en relación al PCM SP21E con una ventana térmica más amplia.

5.6. Resumen e interpretación de resultados

Análisis del Comportamiento Térmico		
Prueba 2 - PCM RT21 vs. Aire		
Descripción de las Tareas	Objetivo	Resultados / Conclusiones
Colocación del mobiliario de prueba con 6,00 kg de PCM RT21 en estado líquido en la Cp0, mientras que la Cp1 se deja vacía. Ninguna de las celdas dispone de ventilación natural ni de radiación solar directa al interior.	Evidenciar los cambios en el comportamiento térmico de un espacio vacío de acuerdo a la introducción de un mobiliario con PCM.	-La mayor diferencia de temperatura ocurre en los periodos de hora pico. -A medida que la temperatura interior se acerca a la ventana térmica del PCM, se estabiliza por más tiempo y aumenta la diferencia entre ambas celdas. -Si no se alcanza la temperatura adecuada para el cambio de fase, las diferencias absolutas entre las celdas son menores. -Cuando la temperatura disminuye dramáticamente, el PCM mantiene una temperatura más elevada y constante en relación al aire.
Prueba 3 - PCM RT21 vs. Agua		
Descripción de las Tareas	Objetivo	Resultados / Conclusiones
Colocar el mobiliario con 6 kg de PCM RT21 en estado líquido en la Cp0 y en la Cp1 25 litros de agua envasados en botellas de 2 litros. Ninguna de las celdas dispone de ventilación natural ni de radiación solar directa al interior.	Comparar el comportamiento térmico de un espacio con PCM con un espacio que contenga agua con la misma capacidad térmica.	-A medida que la temperatura interior se acerca a la ventana térmica del PCM, se estabiliza por más tiempo. -A pesar de que el agua no logra estabilizar la temperatura al igual que el PCM, se ve menos afectada por las fluctuaciones de temperatura; manteniendo temperaturas más cálidas durante la noche y más frescas durante el día.
Prueba 4 - PCM RT21 Horizontal vs. PCM RT21 Vertical		
Descripción de las Tareas	Objetivo	Resultados / Conclusiones
Colocar un componente horizontal con 3 kg de PCM RT21 en estado líquido en la Cp0 y en la Cp1 colocar los mismos paneles, pero en vertical. Ninguna de las celdas dispone de ventilación natural ni de radiación solar directa al interior.	Determinar la ubicación más favorable dentro del mobiliario para el óptimo funcionamiento de los PCM: en posición horizontal o vertical.	-El componente de mobiliario en horizontal presenta un comportamiento más óptimo en relación a su disposición en vertical. Estabilizando la temperatura interior 1,5 - 2,5 horas, manteniendo temperaturas más cálidas durante la noche y más frescas durante el día.
Prueba 5 - PCM RT21 vs. PCM SP21E		
Prueba 5.1: Sin Ventilación		
Descripción de las Tareas	Objetivo	Resultados / Conclusiones
Colocar 6 kg de PCM RT21 solidificado en posición horizontal en la Cp0, y en la Cp1 6 kg de SP21E solidificado en posición horizontal. Ninguna de las celdas dispone de ventilación natural ni de radiación solar directa al interior.	Determinar qué tipo de PCM presenta un mejor funcionamiento: el PCM RT21 o el PCM SP21E y cómo afecta el estado del PCM y la ventilación en el comportamiento térmico.	-El PCM RT21 presenta un comportamiento térmico más eficaz que el PCM SP21E, demostrando mayor estabilidad dentro del rango de temperatura deseado. -El estado inicial del PCM representa un factor determinante a la hora de optimizar su comportamiento térmico, demostrando que puede lograr mantener una temperatura entre los 21 – 23 °C en periodos de hasta 16,5 horas y estabilizar la temperatura hasta por 7 horas. -Una vez el PCM absorbe el calor y se encuentra totalmente líquido, si no cuenta con un sistema de renovación del aire, es incapaz de solidificarse y continuar el ciclo.
Prueba 7.2: Con Ventilación		
Descripción de las Tareas	Objetivo	Resultados / Conclusiones
Colocar 6 kg de PCM RT21 líquido en posición horizontal en la Cp0, y en la Cp1 colocar 6 kg de SP21E líquido en posición horizontal. Ambas celdas disponen de ventilación natural.	Determinar qué tipo de PCM presenta un mejor funcionamiento: el PCM RT21 o el PCM SP21E y cómo afecta el estado del PCM y la ventilación en el comportamiento térmico.	-El PCM RT21 presenta un comportamiento térmico más eficaz que el PCM SP21E, demostrando mayor estabilidad dentro del rango de temperatura deseado. -A medida que aumenta la velocidad del viento y disminuye la temperatura durante la noche, es posible renovar el aire interior y solidificar el PCM en su ventana térmica, logrando la estabilización de la temperatura interior en periodos de hasta 6,5 horas.

Tabla 8. Resumen de resultados del análisis del comportamiento térmico

5.7. Verificación de los resultados

Como verificación de los resultados obtenidos, se consultó con el profesor Albert Castell [56] de la Universidad de Lleida con numerosas publicaciones en relación al comportamiento de los materiales de cambio de fase y su aplicación en la edificación. Éste aclara que, el cambio de fase no se produce a una temperatura concreta, a excepción de materiales muy puros, que no es habitual encontrar en productos comerciales. Por consiguiente, a pesar de que su pico de cambio de fase sea similar, como el caso del PCM RT21, en realidad posee una ventana térmica más amplia. Esto quiere decir que, no se puede garantizar que el cambio de fase se produzca siempre en la misma temperatura.

Otro tema a considerar es el tiempo que el PCM requiere para que se solidifique completamente. Debido a que generalmente los PCM poseen poca conductividad térmica, si no se mantienen suficiente tiempo dentro de la ventana térmica adecuada para su solidificación, puede darse el caso de que no se solidifiquen completamente y, como consecuencia, se utilice solo una fracción de su calor latente. Esto se evidencia en las pruebas donde la temperatura al interior de las celdas es mucho mayor a la ventana térmica del PCM, aquí se aprecian las menores diferencias absolutas y las temperaturas se estabilizan por menor tiempo.

Además, en relación a la temperatura de solidificación, se explica que para sus pruebas cuentan con sistemas de ventilación que permiten inducir la temperatura 1 °C por debajo de la de cambio de fase del material, sin embargo, en la mayoría de los casos han tenido problemas para conseguir una buena solidificación. Esto sugiere que, el PCM precisa de una temperatura ambiente de al menos 2 o 3 °C inferior a su ventana térmica para lograr una completa solidificación.

Un último tema que pudiera explicar que los resultados no siempre fueran los deseados, es que el PCM presente subenfriamiento, donde no logra solidificar hasta una temperatura inferior a la teórica. Sin embargo, en este caso no hay muestras de este fenómeno ya que, al realizar la Prueba 5: PCM RT21 vs PCM SP21E sin ventilación, ambos paneles se encontraban solidificados y su temperatura registrada al inicio de la prueba fueron de 20,60 °C y 21,80 °C, las cuales se encuentran dentro de la ventana térmica de estos productos.

6. RECOMENDACIONES PARA LA INTEGRACIÓN DE LOS PCM EN EL MOBILIARIO

Tomando como base lo estudiado en el estado del arte junto con los resultados obtenidos del estudio experimental, se proponen algunas recomendaciones para la integración eficiente de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior de acuerdo a diferentes criterios:

Selección del PCM

- Escoger una ventana térmica adecuada al lugar y la época del año (invierno – verano) en la que se desea que actúe el material. Tomando en cuenta que, según lo estudiado, el PCM precisa de una temperatura ambiente de al menos 2 o 3 °C inferior a su ventana térmica para lograr una completa solidificación. (ver punto 5.7.)
- Como primera aproximación se estima una capacidad de almacenamiento de calor de unos 300 KJ/m² [51] con lo cual, la cantidad necesaria varía de acuerdo a las especificaciones de cada material. Sin embargo, algunos factores como grandes acristalamientos con una transmitancia térmica que pudiera afectar considerablemente la dinámica interior del espacio, pueden demandar un cálculo más preciso de la carga térmica total.

Diseño del Mobiliario

- Comprobar que el PCM sea compatible con su contenedor, ya que pudiera resultar corrosivo para algunos materiales.
- Los PCM por lo general tienen baja conductividad, por lo que para almacenarlos se recomienda la utilización de materiales que faciliten la transferencia de calor.
- Es preferible colocar el PCM en los elementos con más superficie del mobiliario, que generalmente son los componentes horizontales. (ver punto 5.5. Prueba 4) Si los PCM son distribuidos uniformemente en una superficie, todos recibirán la misma cantidad de calor con lo cual, se producirá un cambio de fase homogéneo. Si esa misma cantidad se coloca concentrado en un volumen más compacto, los PCM exteriores recibirán más calor, sin embargo, debido a su baja conductividad, los que se encuentran al centro recibirán menos, pudiendo provocar segregación de fases. (Figura 51)

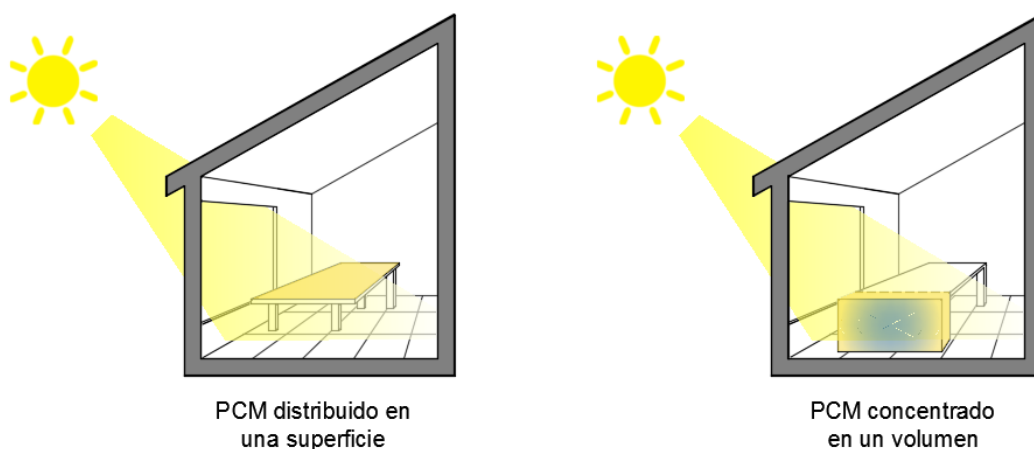


Figura 51. Diferencia del funcionamiento del PCM de acuerdo a su colocación en el mobiliario. Fuente: Mabel Moscoso

- El desarrollo de productos comerciales que ya vienen integrados con PCM, tales como paneles de yeso e incluso textiles, significa que el diseño del mobiliario no está limitado a ser únicamente una mesa con PCM encapsulado en un contenedor. Todo el mobiliario e incluso elemento de decoración puede ser aprovechado: sofás, alfombras, estantes, cojines o persianas; todos poseen un gran potencial para el almacenamiento de calor.

Implementación

Como sistema pasivo, su implementación es recomendada en zonas que presenten climas variables con mayor amplitud térmica, de manera que la temperatura ambiente por si sola sea suficiente para realizar el cambio de fase. Como es el ejemplo del clima continental que puede presentar oscilaciones térmicas diarias entre 10 y 20 °C. [57]

En zonas caracterizadas por temperaturas estables, con menores fluctuaciones, es necesario combinarlo con métodos complementarios para producir la descarga completa del material:

- Si durante el día la temperatura es menor a la de cambio de fase, una solución recomendada es la colocación del mobiliario lo más cerca posible de las ventanas; de esta forma es capaz de absorber el calor necesario para su fusión.

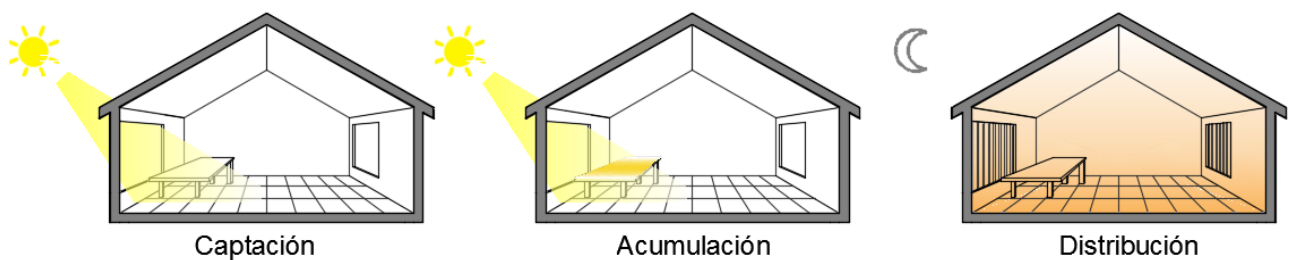


Figura 52. Proceso de captación, acumulación y distribución de calor. Fuente: Mabel Moscoso

- Si durante la noche la temperatura es mayor a la de cambio de fase, la ventilación es esencial para lograr que el PCM se descargue completamente; ya sea mediante ventilación cruzada o algún tipo de ventilación mecánica.

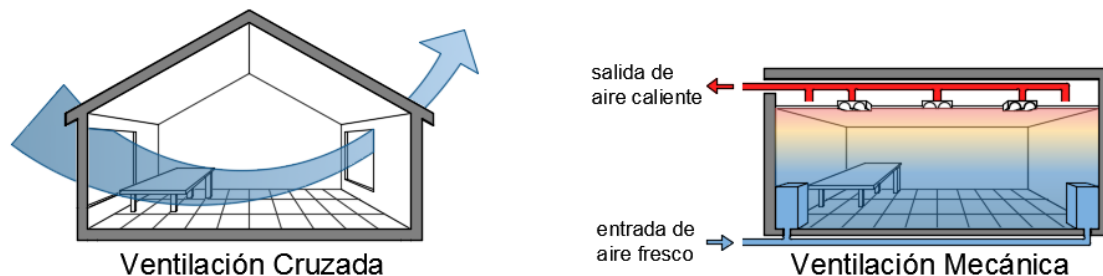


Figura 53. Ventilación cruzada y mecánica para la descarga del PCM. Fuente: Mabel Moscoso

Como sistema activo se presentan dos opciones:

- Actuar como complemento de un sistema activo, como el suelo radiante. Los elementos de mobiliario pueden arrojar sombra en la superficie inferior sobre la cual se colocan y producir temperaturas locales capaces de disminuir hasta en un 83% la efectividad del suelo radiante en esas zonas. [42] Mobiliarios con las propiedades térmicas de los PCM actuarían en conjunto con estos sistemas, evitando su sobredimensionamiento y aumentando la efectividad de unidades más pequeñas y de menor consumo.

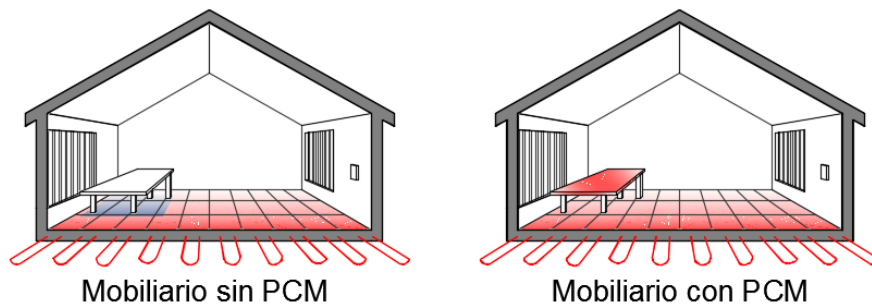


Figura 54. Diferencia entre el funcionamiento de un suelo radiante con un mobiliario sin PCM vs. con PCM.
Fuente: Mabel Moscoso

- Integración del mobiliario con un sistema controlado por termostato que regule la apertura de las ventanas para la ventilación o el sistema de climatización a utilizar. De esta forma, estos sistemas actuarán exclusivamente en los momentos en que la temperatura interior se encuentre fuera de la ventana térmica de funcionamiento del material y solo por el tiempo necesario para inducir la carga o descarga completa del PCM.

Esta solución resulta útil para aquellas edificaciones donde ya se utilizan sistemas activos de climatización, ya que reduciría su uso a pocas horas del día, representando un ahorro económico y energético. Un ejemplo sería un edificio de oficinas con sistema de climatización, donde se lleve una jornada de trabajo de 40 horas semanales.

En el caso de temperaturas de invierno, es necesaria la utilización de los sistemas de climatización durante las 8 horas de jornada laboral diaria para mantener la temperatura interior dentro de los límites de confort (21 – 23 °C). Si estas horas se comparan con las horas punta y valle de la tarifa eléctrica con discriminación horaria⁵ (Figura 55) se observa cómo más del 60% del consumo eléctrico diario se realiza en las horas punta, donde la tarifa es el doble que en las horas valle. [58]

⁵ La tarifa eléctrica con discriminación horaria establece un precio diferente de KWh según el periodo horario. En verano: Horas Punta: 13.00h-23.00h. Horas Valle: 23.00h-13.00h. En invierno: Horas Punta: 12.00h-22.00h. Horas Valle: 22.00h-12.00h. [58]

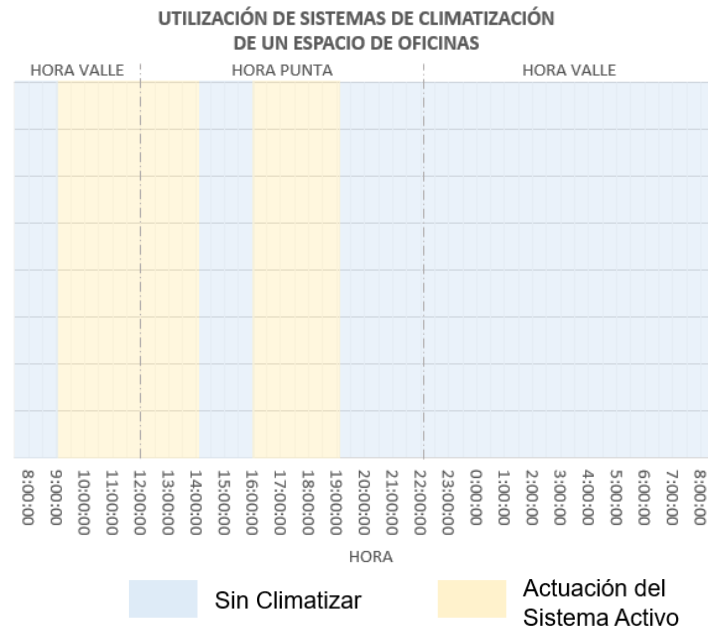


Figura 55. Esquema de la utilización de sistemas activos de climatización en un espacio de oficinas. Basado en una jornada laboral de 8 horas diarias.

Con la introducción de mobiliarios con PCM es posible una mejor gestión de los sistemas de climatización. Tal como se demostró en la Prueba 5.1. (ver punto 5.5.) una vez el PCM se encuentra solidificado, puede tardar hasta 12 horas en alcanzar una temperatura de más de 23 °C. Lo que significa que solo se necesitarían los sistemas activos en horas de la mañana, fuera de horas punta, para solidificar el PCM y a partir de ahí, la capacidad térmica del PCM sería suficiente para mantener el espacio interior dentro de los límites de confort por el resto de la jornada laboral. (Figura 56)

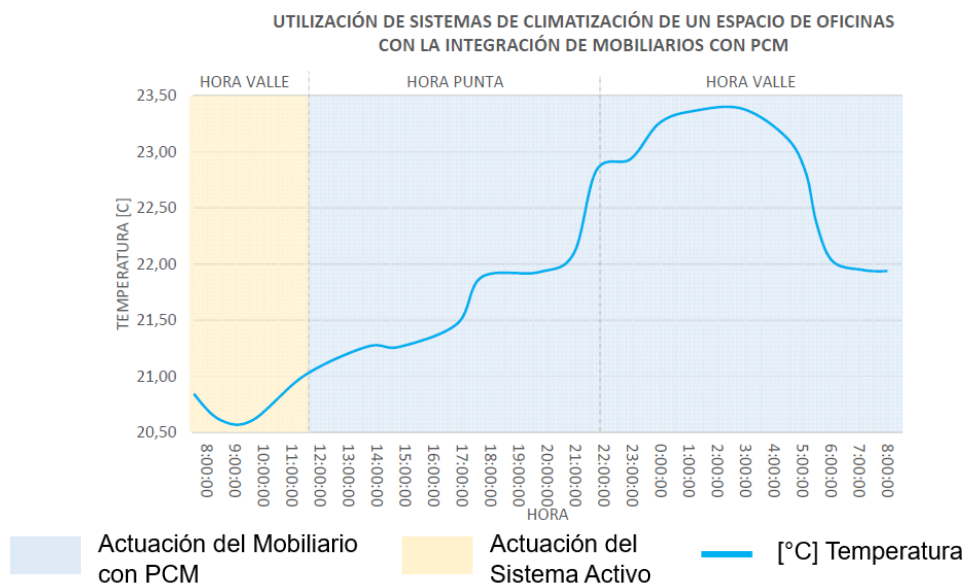


Figura 56. Esquema de la utilización de sistemas activos de climatización en un espacio de oficinas con la integración de mobiliarios con PCM. Basado en los resultados de la Prueba 5.1.: RT21 vs. PCM SP21E – sin ventilación. 28/06/2016 – 29/06/2016 (ver punto 5.5.)

7. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo presentado en el estado del arte, existen muy pocos estudios relacionados con la implementación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior; a pesar de que diversos estudios resaltan el impacto del mobiliario en la dinámica térmica interior y en el confort de los ocupantes.

A partir de estos antecedentes, se realizó un estudio experimental con el fin de analizar el comportamiento térmico de espacios interiores de acuerdo a la introducción de mobiliarios con PCM y elaborar algunas recomendaciones para una implementación eficiente.

En base a los resultados del estudio realizado, se presentan las principales conclusiones:

- En esta aplicación, el almacenamiento de energía térmica no se utiliza para satisfacer la demanda energética de un edificio, sino para reducirla a través del desplazamiento de la carga pico de energía y para aumentar el confort térmico mediante la disminución de las fluctuaciones de temperatura.
- El principal desafío de su implementación está en obtener las temperaturas adecuadas para el cambio de fase. Si la temperatura ambiente por sí sola no es suficiente, el recurso de ventilación, ya sea natural o artificial, es esencial para lograr la descarga completa del material.
- Mediante la introducción de mobiliarios con PCM es posible mejorar la sensación térmica de los usuarios hasta por 3,5°C, manteniendo temperaturas constantes durante 6 y 7 horas que permiten desplazar la carga pico a horas valle donde la tarifa eléctrica es menor, significando un ahorro energético y económico.

Las futuras investigaciones tendrán como parte de sus objetivos:

- Continuar los estudios experimentales en relación con:
 - La temperatura, el tiempo y flujo de aire necesarios para conseguir la descarga completa del material.
 - Influencia en la sensación térmica de los usuarios, ya que hasta ahora solo se han realizado pruebas en celdas vacías.
- Proponer diferentes diseños y tipos de mobiliario que optimicen el funcionamiento de los PCM.
- Evaluar los costos – beneficios para comprobar la viabilidad de su implementación.
- Realizar simulaciones mediante modelos térmicos dinámicos, que permitan obtener valores más precisos en relación al comportamiento térmico de los espacios y así diseñar sistemas más eficientes.

8. AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer al profesor Joan-Lluís Zamora y al Laboratorio de Innovación y Tecnología de la Arquitectura de la ETSAV por haber proporcionado el material necesario – Paneles CSM con PCM RT21 y SP21E – para la realización del estudio experimental.

A la Plataforma de Arquitectura y Sostenibilidad (PAuS) por haber facilitado las celdas de pruebas y al profesor Oriol Muntané, por la orientación y sobre todo disposición para ver completado este trabajo.

9. REFERENCIAS

- [1] IEA, «Web Oficial ECES IA (Energy Conservation Through Energy Storage),» [En línea]. Available: <http://www.iea-eces.org/>. [Último acceso: Marzo 2016].
- [2] B. Zalba, "Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Procedimiento experimental," *Departamento de ingeniería mecánica. Universidad de Zaragoza*, 2002.
- [3] B. Kılış y S. Kakaç, «Importance of Energy Storage,» de *Energy Storage Systems*, Springer Netherlands, 1989.
- [4] REVE - Wind Energy and Electric Vehicle Review, «The Need to Store Energy,» Noviembre 2010. [En línea]. Available: <http://www.evwind.es/2010/11/23/the-need-to-store-energy/8489>. [Último acceso: Septiembre 2016].
- [5] «Web Oficial UltraBattery Energy Storage,» [En línea]. Available: <http://www.ultrabattery.com/why-energy-storage/>. [Último acceso: Septiembre 2016].
- [6] «Tipos de Energía,» [En línea]. Available: <http://tiposdeenergia.info/tipos-de-energia/>. [Último acceso: Marzo 2016].
- [7] A. Sharma, V. Tyagi, C. Chen y D. Buddhi, «Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, nº 2, pp. 318-345, 2009.
- [8] «Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y Formación al Profesorado,» [En línea]. Available: http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/termica.htm. [Último acceso: Marzo 2016].
- [9] A. Oliver, F. Neila y A. García-Santos, «Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica,» *Materiales de Construcción*, vol. 62, nº 305, pp. 131-140, 2012.
- [10] M. Farid, A. Khudhair, S. Razack y S. Al-Hallaj, «A review on phase change energy storage: materials and applications,» *Energy Conversion and Management*, vol. 45, nº 9-10, p. 1597–1615, 2004.
- [11] Eco Cooling Solutions, «Bioclimatización por técnicas evaporativas. Guía de información y aplicación del sistema,» [En línea]. Available: <http://biocool.info/gestion/imagenes/es/archivos/guia-biocool.pdf>. [Último acceso: Junio 2016].
- [12] Cofrico Grupo, «Sistema de aire acondicionado milenario,» 15 Septiembre 2010. [En línea]. Available: <http://www.cofrico.com/newswp/blog/sistema-de-aire-acondicionado-milenario/>. [Último acceso: Junio 2016].
- [13] Revista Mundo HVACR, "Aplicación del Enfriamiento Evaporativo al Acondicionamiento de Locales," [Online]. Available:

<https://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2008/12/aplicacion-del-enfriamiento-evaporativo-al-acondicionamiento-de-locales/>. [Accessed Julio 2016].

- [14] «Norma UNE-EN ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local».
- [15] B. Givoni, Man, Climate and Architecture, Elsevier Science Ltd, 1976.
- [16] Universidad de Alcalá, «Recursos Informáticos - Carta bioclimática de Olgyay,» [En línea]. Available: https://portal.uah.es/portal/page/portal/epd2_asignaturas/asig32954/informacion_academica/100%20%20%20%20HERRAMIENTAS_Climogramas.pdf. [Último acceso: Septiembre 2016].
- [17] Secretaría de Estado de Energía - Gobierno de España, «Reglamento Instalaciones Térmicas en los Edificios,» [En línea]. Available: <http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Paginas/InstalacionesTermicas.aspx>.
- [18] B. Zalba, J. Marin, L. Cabeza y H. Mehling, «Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications,» *Applied Thermal Engineering*, nº 23, p. 251–283, 2003.
- [19] «La Bitácora de Vuelo - Tema 1: Fases del Agua,» 17 Octubre 2015. [En línea]. Available: <http://www.labitacoradevuelo.com.ar/2015/10/1.html>. [Último acceso: Julio 2016].
- [20] S. E. Kalnæs and B. P. Jelle, "Phase Change Materials for Building Applications: A State-of-the-Art Review and Future Research Opportunities," *Energy and Buildings*, vol. 94, pp. 150-176, 2015.
- [21] A. Abhat, «Low temperature latent heat thermal energy storage - Heat storage materials,» *Solar Energy*, vol. 30, pp. 313-332, 1983.
- [22] H. Mehling y L. Cabeza, Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [23] V. Tyagi y D. Buddhi, «PCM thermal storage in buildings: A state of art,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, nº 6, p. 1146–1166, 2007.
- [24] G. Lane, Solar heat storage: Latent heat materials. Volume II. Technology, Boca Raton, FL, Estados Unidos: CRC Press, Inc., 1986.
- [25] J. Sánchez, «Los tejidos inteligentes y el desarrollo tecnológico de la industria textil,» *Técnica Industrial*, nº 268, Marzo-Abril, 2007.
- [26] H. Mehling, S. Hiebler y L. Cabeza, «News on the application of PCMs for heating and cooling of buildings.,» *3rd workshop IEA ECES Annex 17 "Advanced thermal energy storage techniques - Feasibility studies and demonstration projects"*, 2002.
- [27] «Web Oficial Rubitherm Technologies GmbH,» [En línea]. Available: <http://www.rubitherm.eu/en/applications.html>. [Último acceso: Mayo 2016].

- [28] S. Mondal, «Phase change materials for smart textiles – An overview,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 1536-1550, 2008.
- [29] J. Kośny, PCM-Enhanced Building Components. An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures, Boston, MA. Estados Unidos: Springer, 2015.
- [30] M. Sherburne, «MIT Technology Review,» 22 Junio 2010. [En línea]. Available: <https://www.technologyreview.com/s/419445/the-house-of-the-day-after-tomorrow/>. [Último acceso: Agosto 2016].
- [31] A. Waqas y Z. U. Din, «Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings- A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, p. 607–625, 2013.
- [32] L. Lan, P. Wargocki y Z. Lian, «Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort,» *Energy and Buildings*, vol. 43, nº 5, pp. 1057-1062, 2011.
- [33] L. Bourdeau, «Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage,» *Proceedings of the fifth national passive solar conference. American Solar Energy Society*, p. 297–301, 1980.
- [34] «Catálogo Comercial BASF - Micronal,» [En línea]. Available: <http://www.micronal.de/portal/streamer?fid=381233>. [Último acceso: Julio 2016].
- [35] «Web Oficial Solar Decathlon,» [En línea]. Available: <http://www.solardecathlon.gov/past/2007/teams.html>. [Último acceso: Septiembre 2016].
- [36] J. Fehrenbacher, «SOLAR DECATHLON 2007: Darmstadt's Stunning Solar House. Inhabitat,» 2007. [En línea]. Available: <http://inhabitat.com/solar-decathlon-technische-universitat-darmstadt/>. [Último acceso: Agosto 2016].
- [37] «Web oficial del equipo de diseño del North House para el "Energy Solar Decathlon 2009",» [En línea]. Available: <http://www.team-north.com/design/>. [Último acceso: Agosto 2016].
- [38] «Web Oficial Fabricantes Cosella-Dorken,» [En línea]. Available: <http://www.cosella-dorken.com/bvf-ca-en/projects/pcm/northhouse.php>. [Último acceso: Agosto 2016].
- [39] R. Ansuini, R. Larghetti, A. Giretti y M. Lemma, «Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control,» *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 3019-3026, 2011.
- [40] T. Kondo y S. Iwamoto, «Research on Thermal Storage using Rock Wool PCM Ceiling Board,» *Kanagawa University*.
- [41] «Web Oficial GlassX North America,» [En línea]. Available: <http://www.glassxpcm.com/how-glassx-works/>. [Último acceso: Agosto 2016].
- [42] H. Johra y P. Heiselberg, «(under revision). Influence of internal thermal mass on the indoor thermal dynamics and integration of phase change materials in furniture for building energy storage: A review.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

- [43] Z. Kang, X.-H. Liu y Y. Jiang, «Application of radiant floor cooling in a large open space building with high-intensity solar radiation,» *Energy and Buildings*, vol. 66, p. 246–257, 2013.
- [44] «Web Oficial Adream Competition,» [En línea]. Available: <http://www.adream2012.eu/en/node/455>. [Último acceso: Agosto 2016].
- [45] «Web Oficial The ZEF Program,» [En línea]. Available: <http://zef-design.tumblr.com/download>. [Último acceso: Agosto 2016].
- [46] «Plataforma de Arquitectura y Sostenibilidad (PAuS),» [En línea]. Available: <http://www.upc.edu/sct/es/servei/52/plataforma-arquitectura-sostenibilidad-paus.html>. [Último acceso: Septiembre 2016].
- [47] «Web Oficial Servei Meteorològic de Catalunya - EMA Sant Cugat del Vallès - CAR,» [En línea]. Available: <http://www.meteo.cat/observacions/xema/dades?codi=XV&dia=2016-04-18T00:00Z>. [Último acceso: Septiembre 2016].
- [48] «Información comercial panel CSM - Rubitherm Technologies GmbH,» [En línea]. Available: <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/makroverkaspelung-csm>. [Último acceso: Mayo 2016].
- [49] «Ficha Técnica PCM RT21 - Rubitherm Technologies GmbH,» [En línea]. Available: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_RT21_EN_05112015.PDF. [Último acceso: Mayo 2016].
- [50] «Ficha Técnica SP21E - Rubitherm Technologies GmbH,» [En línea]. Available: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_SP21EK_EN_02062016.PDF. [Último acceso: Mayo 2016].
- [51] «BASF - Micronal PCM: Notes on planning with phase-change materials,» [En línea]. Available: http://micronal-pcm-app.de/index.php?article_id=3&clang=1. [Último acceso: Abril 2016].
- [52] «Calor Específico del Agua - vaxasoftware,» [En línea]. Available: http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/caloresph2o.pdf. [Último acceso: Junio 2016].
- [53] «Densidad del Agua - vaxasoftware,» [En línea]. Available: http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/denh2o.pdf. [Último acceso: Junio 2016].
- [54] «Tabla de Densidades - vaxasoftware,» [En línea]. Available: http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/fis/densidades.pdf. [Último acceso: Junio 2016].
- [55] «Tabla de Calor Específico - vaxasoftware,» [En línea]. Available: http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/fis/calorespec.pdf. [Último acceso: Junio 2016].

- [56] «Research Gate - Publicaciones Albert Castell,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Albert_Castell. [Último acceso: Septiembre 2016].
- [57] «Mapa de Amplitudes Térmicas de España,» [En línea]. Available: <http://gelabesana.blogspot.com.es/2014/10/comentario-mapa-amplitud-termica.html>. [Último acceso: Septiembre 2016].
- [58] «ENDESA - Tarifas con discriminación horaria. Ficha One Luz Nocturna,» [En línea]. Available: <https://www.endesaclientes.com/static/iberia/ficha-one-luz-nocturna.pdf>. [Último acceso: Septiembre 2016].
- [59] «Repositorio Universidad de Chile - Definición Nucleación,» [En línea]. Available: http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_quimicas_y_farmaceuticas/castro_e02/parte1b.html. [Último acceso: Septiembre 2016].